ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

Հատոր 77 N 1 2024

ՀՈՒՆՎԱՐ – ՄԱՐՏ

ԵՐԵՎԱՆ 2024

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА АРМЕНИИ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Том 77 N 1 2024

ЯНВАРЬ – МАРТ

EPEBAH 2024

PROCEEDINGS

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

SERIES OF TECHNICAL SCIENCES

Volume 77 N 1 2024

JENUARY – MARCH

YEREVAN 2024

Журнал издается с 5.01.1948 г. Выходит 4 раза в год

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Գլխավոր խմբագիր՝ Մելիքյան Վ.Շ., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ Գլխ. խմբագրի տեղակալ՝ Գրիգորյան Ա.Խ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ Պատասխանատու քարտուղար՝ Մեյրանյան Ժ.Ս., ՀՀ Խմբագրական կոյեգիա՝ Աղբալյան Ս.Գ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ Աղանյան Լ.Հ., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ **Բաղդասարյան Հ.Վ**., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ **Բաղդասարյան Մ.Ք.**, տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ Գոնեյմա Մ., տ.գ.թ., Եգիպտոս **Գրիմբյաթ Վ**., տ.գ.թ., Չիլի **Դոկիչ Բ**., տ.գ.դ., Բոսնիա և Հերցեգովինա **Զորյան Ե**., տ.գ.թ., ԱՄՆ **Իլյուշենկո 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 Ղուլյան Ա.Գ., ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ Մանդալիկա U., տ.գ.թ., Հնդկաստան Մարուխյան Ո.Չ., տ.գ.թ., պրոֆ., ՀՀ Միխայլնիչ Ա.Ա., տ.գ.դ., պրոֆ., Բելառուս Շլիխտման Ու., տ.գ.թ., Գերմանիա **Չանգ Ֆ.,** Թայվանի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., Թայվան **Չապլիգին Յու.Ա.,** ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ **Պետրոսյան Օ.Հ.,** տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ **Պետրոսյանց Կ.Օ.,** տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ **Սապատնեկար Ս.,** տ.գ.թ., ԱՄՆ **Սարգսյան Յու.Լ.,** ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ **Միմոնյան Մ.Հ.,** տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ **Ստեմպկովսկի Ա.Լ.,** ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ **Վորոբլով Ա.Ե.**, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ **Տիխոմիրով Գ.Վ.,** ֆ.-մ.գ.դ., ՌԴ **Ցանովա Ս.,** տ.գ.թ., Բուլղարիա **Ուբար Ռ.**, Էստոնիայի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., Էստոնիա

Ուսանով Վ.Ի., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор Меликян В.Ш., член-корр. НАН РА., д.т.н., проф., Армения Заместитель главного редактора Григорян А.Х., д.т.н., проф., Армения Ответственный секретарь Сейранян Ж.С., Армения Редколлегия: Агбалян С.Г., д.т.н., проф., Армения Акопян В.Н., д.ф.-м.н., Армения Асланян 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 Гулян А.Г., академик НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Армения Докич Б., д.т.н., Босния и Герцеговина Зорян Е., к.т.н., США Ильющенко А.Ф., член-корр. НАН Беларуси, д.т.н., проф., Беларусь Красников Г.Я., академик РАН, д.т.н., проф., Россия Куртуа Б., к.т.н., Франция Лан Ч., к.т.н., Китай Мандалика С., к.т.н., Индия Марухян В.З., к.т.н., проф., Армения Михайлевич А.А., д.т.н., проф., Беларусь Петросян О.А., д.т.н., проф., Армения Петросянц К.О., д.т.н., проф., Россия Сапатнекар С., к.т.н., США Саркисян Ю.Л., академик НАН РА, д.т.н., проф., Армения Симонян С.О., д.т.н., проф., Армения Стемпковский А.Л., академик РАН, д.т.н., проф., Россия Тихомиров Г.В., д.ф.-м.н., Россия Убар Р., академик НАН Эстонии, д.т.н., проф., Эстония Усанов В.И., д.т.н., проф., Россия Хаханов В.И., академик Академии наук Украины по прикладной радиоэлектронике, д.т.н., проф., Украина Цанова С., к.т.н., Болгария Чанг Ф., академик Национальной академии Тайваня, д.т.н., Тайвань Чаплыгин Ю.А., академик РАН, д.т.н., проф., Россия Шлихтманн У., к.т.н., Германия

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief: Melikyan V.Sh., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia Deputy Editor-in-Chief: Grigoryan A.Kh., Sci.Dr., Prof., Armenia Executive Secretary: Seyranyan Zh.S., Armenia **Editorial Board:** Aghbalyan S.G., Sci.Dr., Prof., Armenia Aslanyan L.H., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia 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 Ghulyan A.G., Academician of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia Grimblatt V., Ph.Dr., Chile Hahanov V.I., Academician of Academy of Sciences of Ukraine in Applied Radioelectronics, Sci.Dr., Prof., Ukraine Hakhumyan A.A., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia Hakobyan V.N., Sci.Dr., Armenia Ilyushenko A.F., Corr.member of NAS of Belarus, Sci.Dr., Prof., Belarus Krasnikov G.Y., Academician of RAS, Sci.Dr., Prof., Russia Lan Ch., Ph.Dr., China Mandalika S., Ph.Dr., India Marukhyan V.Z., Ph.Dr., Prof., Armenia Mikhaylevich A.A., Sci.Dr., Prof., Belarus Petrosyan O.H., Sci.Dr., Prof., Armenia Petrosyants K.O., Sci.Dr., Prof., Russia Sapatnekar S., Ph.Dr., USA Sargsyan Yu.L., Academician of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia 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՝

ታ.ሀ. ሀԵՅՐԱՆՅԱՆ
Հ.Յ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ
Հ.Չ. ՂԱՉԱՐՅԱՆ

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

ISSN 0002-306X. ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղ. Տեխն. գիտ. սերիա. 2024. Հ. LXXVII, N1

*ኢ*SԴ 661.685

ՄԵՏԱԼՈՒՐԳԻԱ

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.1-5

Ս.Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Ա.Կ. ԴԱՎԻԴՅԱՆ, Ա.Ս. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ա.Ռ. ՀԱԿՈԲՅԱՆ, Տ.Ն. ՍԱՖԱՐՅԱՆ

ՄՈԼԻԲԴԵՆԻ ԴԻՍԻԼԻՑԻԴԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ՝ ՄՈԼԻԲԴԵՆԻՏԱՑԻՆ ԽՏԱՆՅՈՒԹԵՐԻ ՄԱՔՐՄԱՄԲ

Հետազոտվել են մոլիբդենիտային խտանյութերի ֆլոտոռեագենտներից և խառնուրդներից մաքրման, շլամազերծման գործընթացները։ Մտացված համալիր հետազոտության արդյունքում մշակվել է մոլիբդենիտային խտանութերից սիլիկաջերմային մեթոդով մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման ժամանակակից տեխնոլոգիա, որը ներառում է մոլիբդենի դիսուլֆիդի մաքրում խառնուրդ էլեմենտներից, ստացված մաքուր MoS₂-ի և Si-ի փոշեխառնուրդի մամլում և բրիկետների բարձրջերմաստիձանային սինթեզ ջրածնի միջավայրում։

Առանցքային բառեր. մոլիբդենիտային խտանյութ, տարրալուծում, մաքրում, մոլիբդենի դիսիլիցիդ, սառը մամլում, սիլիցիում, սինթեզ, ջրածին։

Ներածություն. Մոլիբդենի դիսիլիցիդը, շնորհիվ բարձր ջերմակայունության (1300...1800 ^{*o*}C ջերմաստիձաններում), էլեկտրա- և ջերմահաղորդականության, լայն կիրառություն է գտել ժամանակակից տեխնիկայում, հատկապես՝ տաքացուցիչների արտադրությունում՝ բարձրջերմաստիձանային էլեկտրավառարանների պատրաստման համար։ Բացի այդ, մոլիբդենի դիսիլիցիդը մեծ կիրառություն ունի պողպատի և կոմպոզիցիոն նյութերի արտադրությունում` քիմիապես կայուն, կիզակայուն ծածկույթների ստացման և ատոմային կայանքներում ջերմափոխանակիչների պատրաստման համար [1-4]։

Մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման ամենատարածված մեթոդը բարձր ջերմաստիձանային ինքնատարածվող սինթեզն է (ԲԻՍ-մեթոդ) [5], երբ օգտագործվում են մաքուր մետաղական մոլիբդենափոշի և սիլիցիում։ Դրա հետ մեկտեղ՝ մաքուր մոլիբդենափոշու ստացման տեխնոլոգիան բազմափուլ է և կապված է մեծ ծախսերի հետ, մյուս կողմից՝ մետաղական մոլիբդենափոշու ստացման համար մոլիբդենիտային խտանյութի օքսիդացուցիչ թրծման արդյունքում մթնոլորտ են արտանետվում զգալի քանակությամբ ծծմբային գազեր։

Ելնելով վերոհիշյալից՝ աշխատանքի նպատակն է տեղական մոլիբդենիտային խտանյութերից մշակել բնապահպանական նորմերը բավարարող մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման ժամանակակից տեխնոլոգիա։

Խնդրի դրվածքր և մեթոդիկայի հիմնավորումը։ Փորձի իրականացման համար օգտագործվել է մոլիբդենիտային խտանյութ՝ հետևյալ մոտավոր բաημηρηιριμιψ, %. Mo=48,4; Cu=0,87; Fe=2,75; SiO₂=6,14; Al₂O₃=1,06; CaO=1,02; MgO=0,47; S=33,1; Re=0,025 (ձեռք է բերվել ՀՀ «Զանգեզուրի պղնձամոլիբդենային կոմբինատ» ՓԲԸ-ից, КМФ-4 մակնիշի ֆլոտացված մոլիբդենային խտանյութ, ԳՕՍՏ 212-76)։ Քանի որ մոլիբդենիտային խտանյութում պարունակվող խառնուրդների մեծ պարունակությունը կարող է ազդել սինթեզվող մոլիբդենի դիսիլիցիդի հատկությունների վրա, իրականացվել է խտանյութի մաքրում։ Մոլիբդենիտային խտանյութը պարունակում է մինչև 4% ֆլոտոռեագենտներ, որոնք զգալի դժվարություններ են առաջացնում խտանյութերի խառնուրդներից մաքրման հիդրոմետալուրգիական գործընթացում։ Ֆլոտոռեագենտներից խտանլութի մաքրումը կատարվել է նատրիումի մետասիլիկատի և ՕՊ-7 էմուլսարարի ջրային լուծույթով՝ խտանյութի աղացում մանրացման գործընթացում։ Ֆյոտոռեագենտների մաքրումից հետո հնարավորություն է ստեղծվում մանրացված խտանյութը պարզվածքազատման եղանակով մաքրել նաև շլամից՝ SiO2-ից և ածխային մասնիկներից։ Մոլիբդենիտային խտանյութի մաքրումը Ca, Mg, Al, մասնակի Fe խառնուրդներից իրականացվել է 3%-ոց ազոտական թթվով տարրալուծմամբ։ Տարրալուծումն իրականացվել է 40 ºC ջերմաստիձանում, 5 *ժամ* տևողությամբ, որի ընթացքում մոլիբդենիտի տարրալուծման աստիձանը աննշան է ստացվում, երկաթի լուծելիությունը սկզբնականի համեմատ կազմում է 22,5%, իսկ Ca, Mg-ը ամբողջությամբ անցնում են լուծույթ։ Մոլիբդենիտային խտանյութի մաքրումը SIO₂-ից իրականացվել է 20%-ոց ֆտորաջրածնային թթվով՝ 50 °C ջերմաստիձանում 8 ժամ տևողության պայմաններում։ SiO₂-ի պարունակությունը կազմում է 0,04...0,006%։ Մոլիբդենիտային խտանյութի հետագա մաքրումը մնացած Al₂O₃-ի, Fe-ի, Cu-ի խառնուրդներից իրականացվել է 6%-ոց ազոտական թթվով տարրալուծմամբ՝ 50 *°C* ջերմաստիձանում 10 *ժամ* տևողության պայմաններում։ Առաջացած շատ փոքր քանակի մոլիբդենի եռօքսիդի և մոլիբդենաթթվի հեռացման համար խտանյութը լվացվել է 10%-ոց ամոնիումի լուծույթով։ Մաքուր մոլիբդենի դիսուլֆիդը լվացվել է թորած ջրով և չորացվել վակուումային չորանոցում՝ 120 ^{*o*}C ջերմաստիձանում։ Շրջակա միջավայրի պաշտպանության առումով թթու և հիմնային լուծույթները չեզոքացվել են։ Այս եղանակով վերամշակված մոլիբդենի դիսուլֆիդը իր մաքրությամբ համապատասխանում է ստանդարտով (ՏՈՒ 48-19-133-90 «Մոլիբդենի դիսուլֆիդ») ներկայացվող պահանջներին։

Մոլիբդենիտային խտանյութից մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման ժամանակ ընթացող ռեակցիաներից ամենահավանականը հետևյալն է.

$MoS_2 + 3Si + H_2 \uparrow = MoSi_2 + H_2S + SiS:$

Սիլիկաջերմային մեթոդով մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման նպատակով կատարվել է ստեխիաչափային քանակությամբ ելանյութերի՝ մաքրումից հետո ստացված MoS₂-ի և Si-ի (ձեռք է բերվել ՌԴ «Ուրալ ատոմիզացիա» ՍՊԸ-ից Kp00 մակնիշի սիլիցիումի փոշի -50 *մկմ*, ԳOUS 2169-69) խառնում։ Ստացված խառնուրդից սառը մամլման եղանակով պատրաստվել են բրիկետներ (P=250...300 *ՄՊա*), որոնք այնուհետև ենթարկվել են սինթեզի։ Օքսիդացման գործընթացները կանխելու նպատակով վերականգնումը կատարվել է ջրածնի միջավայրում։ Ռեակցիայի արդյունքում մոլիբդենը միանում է սիլիցիումի հետ՝ առաջացնելով մոլիբդենի դիսիլիցիդ, իսկ ծծումբը սիլիցիումի սուլֆիդների (SiS, SiS₂) տեսքով ամբողջությամբ հեռանում է ռեակցիայի տարածքից և կոնդենսացվում սառնարանում։ Սիլիցիումի սուլֆիդները գազային վիձակի անցնում են 1130 ^oC-ից բարձր ջերմաստիձանում։ Ուստի, ռեակցիայի տարածքից սիլիցիումի սուլֆիդների հեռացման համար, սինթեզը կատարվել է 1150 ^oC 60 *րոպե* տևողությամբ։ Փոխազդման տևողության հետագա ավելացումը հանգեցնում է մոլիբդենի դիսիլիցիդի պարունակության չնչին չափով ավելացմանը։

Կատարվել է մոլիբդենի դիսուլֆիդից սիլիկաջերմային մեթոդով մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման գործընթացի հետազոտում՝ ջերմածանրաչափական և դիֆերենցիալ-ջերմային վերլուծության մեթոդով՝ DERIVATOGRAPH-C սարքի միջոցով, մինչև 1200 ^{o}C ջերմաստիձանում, 10 *աստ/րոպե* տաքացման արագությամբ, իներտ (Ar) գազի մթնոլորտում։ Նկ.1-ում բերված է մոլիբդենի դիսուլֆիդից մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման դերիվատագիրը, որի վերլուծությունից երևում է, որ մինչև 900 ^{o}C ջերմաստիձան տաքացնելիս նմուշի զանգվածը դանդաղ պակասում է, 900 ^{o}C ջերմաստիձանից սկսվում է էկզոթերմ գործընթաց, որն ավարտվում է 980 ^{o}C -ում։ Էկզոթերմ էֆեկտը պայմանավորված է մոլիբդենի դիսիլիցիդի գոյացմամբ։ Նմուշի կշիոը, սկսած 940 ^{o}C ջերմաստիձանից, ինտենսիվորեն փոքրանում է, ինչր պայմանավորված է ծծմբի հեռացմամբ՝ SiS-ի տեսքով։

Մոլիբդենի դիսիլիցիդի սինթեզման ժամանակ առաջացած H₂S գազերը կարող են կլանվել NaOH լուծույթով՝ առաջացնելով Na₂S, վերջինս էլ սիլիցիումի սուլֆիդների հետ կարելի է օգտագործել որպես ֆլոտոռեագենտ՝ օքսիդային հանքանյութերի հարստացման գործընթացում։



Նկ. 1. Մաքուր մոլիբդենի դիսուլֆիդից մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման դերիվատագիրը. TG-ն կշոի փոփոխությունն է, DTG-ն՝ զանգվածի փոփոխության արագությունը, DTA-ն՝ դիֆերենցիալ-թերմիկ վերլուծության կորը, T-ն՝ ջերմաստիՃանի փոփոխությունը

Նկ. 2-ում բերված է ստացված մոլիբդենի դիսիլիցիդի միկրոկառուցվածքը, իսկ նկ. 3-ում՝ մոլիբդենիտային խտանյութից սիլիկաջերմային մեթոդով մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման տեխնոլոգիական սխեման։



Նկ. 2. Միլիկաջերմային մեթոդով ստացված մոլիբդենի դիսիլիցիդի միկրոկառուցվածքը



Նկ. 3. Մոլիբդենիտային խտանյութից սիլիկաջերմային մեթոդով մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման տեխնոլոգիական սխեման

Եզրակացություն. Հետազոտվել է մոլիբդենիտային խտանյութերի ֆլոտոազդանյութերից և շլամից մաքրման գործընթացը, որին հաջորդել է խտանյութում առկա խառնուրդ միներալների՝ նոսը թթուներով մաքրման գործընթացը։ Մոլիբդենիտային խտանյութերի մաքրումից ստացված մոլիբդենի դիսուլֆիդից սիլիկաջերմային մեթոդով կատարվել է մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման գործընթացի հետազոտում։ Փոխազդման օպտիմալ ռեժիմ համարվել է 1150 ^{*o*}*C* ջերմաստիՃանը, տևողությունը՝ 60 *րոպե*։ Մինթեզը կատարվել է ջրածնի միջավայրում։

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- 1. Самсонов Г.В., Дворина Л.А., Рудь Б.М. Силициды.- М.: Металлургия, 1979.- 272с.
- Մոլիբդենիտային խտանյութերից մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման տեխնոլոգիայի հետազոտումը / Ս.Գ. Աղբալյան, Ա.Հ. Հովսեփյան, Ա.Ս. Գրիգորյան և ուր. // ՀՀ ԳԱԱ և ՀՊՃՀ տեղեկագիր։ ՏԳ սերիա.- Երևան, 2008.- Հ. 61, №2.- Էջ 237-242:
- McKamey C.G., Totorelli P.F., DeVan J.H., Carmichael C.A. A Study of Pest Oxidation in Polycrystalline MoSi₂ // J. Mater. Res.- 1992.- V.7, №10.- P. 2747-2755.
- Овсепян А.О., Агбалян С.Г., Григорян А.С. Синтез дисилицида молибдена из молибденитовых концентратов // Международная конференция по химии и химической технологии: Сборник материалов.- Ереван, 2007.- С. 142-144.
- 5. Кислый П.С., Бадьян А.Х., Киндышева Б.С., Гарибян Ф.С. Высокотемпературные неметаллические нагреватели.- Киев: Наукова думка, 1981.- 160с.

ՀՀ ԳԱԱ Ընդհանուր և անօրգանական քիմիայի ինստիտուտ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 09.02.2024։

С.А. АРУТЮНЯН, А.К. ДАВИДЯН, А.С. ГРИГОРЯН, А.Р. АКОБЯН, Т.Н. САФАРЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДИСИЛИЦИДА МОЛИБДЕНА ОЧИСТКОЙ МОЛИБДЕНИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Исследованы процессы очистки молибденитовых концентратов от флотореагентов и смесей и процесс обесшламливания. В результате комплексных исследований разработана современная технология производства дисилицида молибдена силикотермическим методом из молибденитовых концентратов, включающая очистку дисульфида молибдена от примесей элементов, прессование смеси полученного чистого порошка MoS₂ и Si и высокотемпературный синтез брикетов в среде водорода.

Ключевые слова: молибденитовый концентрат, разложение, очистка, дисилицид молибдена, холодное прессование, кремний, синтез, водород.

S.A. HARUTYUNYAN, A.K. DAVIDYAN, A.S. GRIGORYAN, A.R. HAKOBYAN, T.N. SAFARYAN

INVESTIGATING THE MOLYBDENUM DISILICIDE PRODUCTION PROCESS BY MOLYBDENITE CONCENTRATES

Processes of purification of molybdenite concentrates from floatation reagents and mixtures, as well as the process of decantation are investigated. As a result of complex invetigations, an up-to-date production technology of molybdenum disilicide is developed by the silicothermal method from molybdenite concentrates, which includes purification of molybdenum disulfide from mixed elements, compression of powder mixture of the received pure MoS_2 and Si and high-temperature synthesis of briquiets in hydrogen environment.

Keywords: molybdenite concentrate, decomposition, purification, molybdenum disilicide, cold compression, silicon, synthesis, hydrogen.

ISSN 0002-306X. ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղ. Տեխն. գիտ. սերիա. 2024. Հ. LXXVII, N1

ՆՅՈՒԹԱԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆ

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.1-12

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՑԱՆ, Գ.Ա. ՎԱՍԻԼՑԱՆ, Ա.Ս. ԱՂԲԱԼՑԱՆ, Ս.Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Ն.Վ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

ՏԱՔ ԱՐՏԱՄՂՄԱՄԲ ՍՏԱՑՎԱԾ ԱՄՐԱՆԱՎՈՐՎԱԾ ՁՈՒԼՄԱՆ ԱԼՅՈՒՄԻՆԱՅԻՆ ԴԵՖՈՐՄԱՑՎՈՂ ՀԱՄԱՁՈՒԼՎԱԾՔՆԵՐԻ ՋԵՐՄԱՑԻՆ ՄՇԱԿՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ուսումնասիրվել են տաք արտամղմամբ ստացված և պողպատյա թելքերով ամրանավորված ձուլման ալյումինային դեֆորմացվող համաձուլվածքների ջերմային մշակման և կառուցվածքի ու հատկությունների ձևավորման գործընթացները։ Արդյունքում ընտրվել են միման և ծերացման լավարկված ջերմաստիձանները՝ T₄=530 \pm 10°C, T₈=80 \pm 10°C, և ծերացման տևողությունը՝ т₈=36 *дии*, որոնք ապահովում են σ₈=570...580 *ՄՆ/*Ք, HB=1240...1250 *ՄՂա*, δ=8,5...9,5% բարձր մեխանիկական հատկությունների ստացում։

Առանցքային բառեր. ձուլում, պողպատյա թելքեր, ամրանավորում, ալյումինային համաձուլվածք, տաք արտամղում, մխում, ծերացում, կարծրություն, ամրություն։

Ներածություն։ Բարձր տեսակարար ամրությամբ, հրամրությամբ, պլաստիկությամբ և այլ արժեքավոր հատկություններով օժտված նոր նյութերի ստեղծման բնագավառում, մեծ հետաքրքրություն են ներկայացնում թեթև մետաղների հիմքով և մետաղական թելքերով ամրանավորված կոմպոզիտային նյութերը, որոնց մայրակը կարող է ամրացվել դիսպերս մասնիկներով կարծրացման և դիսպերս հատիկներով ամրացման մեխանիզմներով։

Հայտնի է [1, 2], որ արդյունաբերական ալյումինային համաձուլվածքների հավասարակշոված կառուցվածքը ներկայացնում է լեգիրող տարրերի ցածր պարունակությամբ պինդ լուծույթ` ինտերմետաղական ֆազերի ներմուծանքներով (Al₂Cu, Al₂CuMg, Mg₂Si, FeAl₃ և այլն)։ Այսպիսի կառուցվածքի դեպքում ալյումինային համաձուլվածքները, որպես կանոն, ունեն ցածր ամրություն և բարձր պլաստիկություն։ Մենյակային ջերմաստիձաններում ալյումինային համաձուլվածքներում առավել անկայուն կառուցվածք է լեգիրող բաղադրիչների գերհագեցած պինդ լուծույթը ալյումինում։ Այսպիսի կառուցվածքի դեպքում ալյումինային համաձուլվածքները նույնապես պլաստիկ են, բայց զգալիորեն ավելի ամուր, քան հավասարակշոված վիձակում։ Ջերմամշակմամբ ամրացվող ալյումինային համաձուլվածքներում առավելագույն ամրության հասնելու նպատակով անհրաժեշտ է այն ամրանավորել մետաղական թելքերով և միսման միջոցով ստանալ անհավասարակշիռ կառուցվածք` լեգիրող տարրերով գերհագեցած պինդ լուծույթ, այնուհետև ծերացման միջոցով նպաստել գերհագեցած պինդ լուծույթի տրոհմանն ու ինտերմետաղական ֆազերի անջատմանը։

Ելնելով վերոհիշյալից՝ աշխատանքի նպատակն է հետազոտել տաք արտամղմամբ ստացված և պողպատյա թելքերով ամրանավորված ձուլման ալյումինային դեֆորմացվող համաձուլվածքների ջերմային մշակման գործընթացը, կառուցվածքի ու հատկությունների ձևավորման մեխանիզմները և ընտրել ու հիմնավորել ջերմամշակման օպտիմալ ռեժիմները։

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը։ Հետազոտություները կատարվել են Al-Cu-Fe-Si համակարգի համաձուլվածքի վրա, որի քիմիական բաղադրությունը բերված է աղյուսակում։ Նշված բաղադրությամբ մայրակն ամրանավորվել է 20 հատ երկայնական 60 *մկմ* տրամագիծ ունեցող պողպատ-40 մակնիշի թելքերով` նկ. 1-ում ցույց տրված սխեմայով։

Աղյուսակ

0,02

94,5



Նկ. 1. Ալյումինային մայրակում պողպատյա թելքի տեղադրման սխեման

Ձուլվածքներում դենդրիտային անհամասեռության վերացման նպատակով դրանք ենթարկվել են հոմոգենացնող թրծման՝ $500\pm10^{\circ}C$ -ում 10 *ժամ* պահմամբ, որից հետո Φ24,5x50 *մմ* չափերով գլանական նմուշները ենթարկվել են տաք արտամղման՝ λ=4 արտամղման գործակցով։ Տաք արտամղումից հետո նմուշները ենթարկվել են թրծման (T=300°C, τ =3 *ժամ*)՝ դրանցում առկա մնացորդային լարումները վերացնելու նպատակով։

Մխման լավարկված ջերմաստիձանի ընտրման նպատակով ստացված նմուշները ենթարկվել են տաքացման 425...525ºC ջերմաստիձանային տիրույթում, պահվել այդ ջերմաստիձանում 15 *րոպե* և մխվել ջրում։ Այնուհետև նմուշները ենթարկվել են արհեստական ծերացման (T_{ծեր} = 120^{*o*}C, τ_{ծեր} = 48 *ժամ*), որից հետո ուսումնասիրվել են մեխանիկական հատկությունները։

Հետազոտության արդյունքները։ Միսնան գործընթացի հետազոտության արդյունքները բերված են նկ. 2-ում։ Մեխանիկական հատկությունների ուսումնասիրման արդյունքում որպես միսնան լավարկված ջերմաստիձան ընտրվել է $T_{uhu} = 515...525^{o}C$, երբ $\sigma_{d} = 555...565 \ U U/u^{2}$, $\delta = 8,5...9,5\%$, HB = 1230... 1250 U J u u. Համաձուլվածքի միկրոկառուցվածքը բերված է նկ. 3-ում։



 U_{4} 2. «A5E+(4,5...5,5)» Си+щипициили рыры» рипиприории ирли/ришури huduaлиишорр ин/ригруши, կшрорпируши и hшршрыршиши ырушршдиши կш/идшолирупир и/рибши дырибшир/астира тишь = 15рпць, Ть = 120 °С, τ_{b} = 48дши

Ինչպես երևում է նկ. 2-ից, միսնան ջերմաստիձանի բարձրացմանը զուգընթաց մեծանում են համաձուլվածքի ամրությունը և կարծրությունը, որը պայմանավորված է միսնան ժամանակ մայրակի առավելագույն լեգիրմամբ և գերհագեցած պինդ լուծույթի ստացմամբ (նկ. 3), որից ծերացման ժամանակ անջատված ինտերմետաղական ֆազերը, բաշխված լինելով ամբողջ ծավալով հավասարաչափ և լինելով խիստ մանրահատիկ, նպաստում են ամրության և կարծրության բարձրացմանը` միաժամանակ փոքրացնելով հարաբերական երկարացումը և պլաստիկությունը։



*Նկ. 3. «А5Е+(4,5...5,5)% Си+щппщшипјш թելքեр» բшпшпппթյшир шјпићишјћи hшиш*ձпи*վшծрի иђирпцшппгдишծрр иђици*ծ *иђашцпи (Тијии = 515...525*°С, *тишь = 15 ппцե) х500*

Հաջորդ փուլում ուսումնասիրվել է ծերացման գործընթացը, երբ տեղի է ունենում միսման ժամանակ ստացված գերհագեցած պինդ լուծույթի տրոհում, ինչն ուղեկցվում է ինտերմետաղական ֆազերի անջատումով։ Միսված ալյումինային համաձուլվածքների մեծ մասի դեպքում այս գործընթացը տեղի է ունենում սենյակային ջերմաստիձաններում (0...30°*C*), և հատուկ տաքացում չի պահանջվում, իսկ որոշ համաձուլվածքներում այն սկսվում է միայն միսված նմուշների տաքացման ժամանակ (սովորաբար մինչև 200°*C* ջերմաստիձաններ), որը բացատրվում է դիֆուզիոն գործընթացների ակտիվացմամբ։ Միսված նմուշները ենթարկվել են ծերացման 20...200°*C* ջերմաստիձանային տիրույթում և պահվել 48 *ժամ*, որից հետո կատարվել են մեխանիկական փորձարկումներ (նկ. 4)։ Հետազոտությունների արդյունքում, որպես ծերացման լավարկված ջերմաստիձան, ընտրվել է 80°*C-ը*, երբ HB = 1230...1250 *ՄՂա*, σ_d = 570...580 *ՄՆ/ւ*², δ = 8...9%:

Փորձերի հաջորդ փուլում կատարվել է ծերացման ջերմաստիձանում նմուշների պահման տևողության լավարկում։ Նմուշները մխվել և ենթարկվել են ծերացման՝ լավարկված ռեժիմներով (T₄ = 525°*C*, τ_4 = 15 *րոպե*, T_{ծեր} = 80°*C*), ու պահվել ծերացման ջերմաստիձանում 0...72 *ժամ* տևողությամբ, որից հետո սառեցվել են և ենթարկվել մեխանիկական փորձարկումների (նկ. 5)։ Արդյունքում որպես պահման լավարկված տևողություն ընտրվել է 36 *ժամը*, երբ HB = 1240...1250 *ՄՂա*, σ_d = 570...580 *ՄՆ/մ*², δ = 8,5...9,5 %.



 U_{l} . 4. «A5E+(4,5...5,5)% Cu+щипициили рыры» рипиприории ирли/ришури huduaлиишорр ин/ппруши, կшрорппруши h нирирыриции ырушридний կш/идиолгрупир окридици окриин/бширд. Tu = 525 °C, tщин = 15 риць, τ_{δ} = 48 дии



 U_{4} . 5. «A5E+(4,5...5,5)%Си+щппишили рыры» гипипрпирјинг шулинћишући hunuwaniимбрћ ширпирјић, կипорпирјић և hипиприпицић երկипишићи и ићициолирјић окрицици укришинћа ићици ишћиш ићиппирјпићр. Ти = 525 °С, τ_{uyuh} = 15рпцк, Тв = 80°С

Ընտրված ռեժիմներով ջերմամշակված համաձուլվածքի միկրոկառուցվածքը բերված է նկ. 6– ում, համաձայն որի՝ այն ալյումինի հիմքով պինդ լուծույթ է` շրջապատված Al₂Cu և FeAl₃ինտերմետաղական ֆազերով։



Նկ. 6. Լավարկված ռեժիմներով միված և ծերացման ենթարկված «А5Е+(4,5...5,5)%Си+ +պողպատյա թելքեր» բաղադրությամբ այումինային համաձուլվածքի միկրոկառուցվածքը *Т*միա = 515...525^oC, тщин = 15 рոպե, Тъեр = 80...90^oC, тщин = 36 дшմ (x500)

Պինդ վիճակում ալյումինի և երկաթի միջև տեղի ունեցող պինդֆազային փոխազդեցությունները հետազոտվել են մի շարք հեղինակների կողմից, սակայն առավել հետևողական աշխատանքներ կատարել են Նելմանը ու Դիտրիխը [3]։ Համաձայն այդ հետազոտությունների` ալյումինի հետ երկաթի քիմիական փոխազդեցությունն սկսվում է 590...600°*C* ջերմաստիձաններում, ընդ որում, այն սկսվում է որոշակի ինկուբացիոն ժամանակահատվածից հետո։ Փոխազդեցության արագությունը սկզբում աձում է, իսկ մի քանի ժամ անց` իսպառ արգելակվում։ Հաստատվել է նաև այն, որ պողպատում առկա ածխածինը խոչընդոտում է փոխազդեցությանը։ Նմուշների վրա արված հատուկ նիշերի միջոցով հաստատվել է, որ Al-Fe առաջնային սահմանը համապատասխանում է Al - Fe2Al5սահմանին։ Դիֆուզիային մասնակցում են միայն Al-ի ատոմները, Fe-ի ատոմներն ընդհանրապես չեն մասնակցում այդ գործընթացին։ Սահմանային շերտում այդպիսի միակողմանի դիֆուզիայի արդյունքում կուտակվում են ծակոտիներ։ Ծակոտկենության մեծացումը հանգեցնում է սահմանային շերտում կոնտակտի քայքայմանը և ինտերմետաղական շերտի հաստության աձի նվազմանը։ Նախնական պլաստիկ դեֆորմացիաի դեպքում փոխազդեցության սկզբի ջերմաստիձանը մի փոքր նվազում է` մինչև ~560º*C*, իսկ մեծ դեֆորմացիաների դեպքում` մինչև ~400º*C*:

Ելնելով վերհիշյալից՝ կատարվել են հետազոտություններ՝ ձուլմամբ ստացված և այնուհետև տաք արտամղված պողպատյա թելքերով ամրանավորված համաձուլվածքում առկա միջֆազային շերտի բնութը պարզելու համար։ Այդ նպատակով կատարվել է միկրոզոնդային անալիզ, որի արդյունքում սահմանային տիրույթում ինտերմետաղական ֆազեր (FeAl₃, Fe₂Al₅) չեն հայտնաբերվել (նկ. 7)։ Կոնցենտրացիոն կորերի թեքությունը վկայում է միջֆազային տիրույթում ալյումինում երկաթի պինդ լուծույթի առկայության փաստը։



Նկ. 7. «АІ – պողպատ» կոմպոզիտային նյութում կոմպոնենտների բաշխվածությունը (x600). պատկերները ստացվել են ռենտգենյան Ճառագայթման միջոցով. ա) Fe–ի բաշխվածությունը, բ) Fe–ի և AI-ի բաշխվածության ինտենսիվության փոփոխությունը

Կատարվել է ձուլված և արտամղման տարբեր ռեժիմներով տաք արտամղված նմուշների մակրոկառուցվածքի հետազոտում (նկ. 8)։



Նկ. 8. «Մայրակ – թելք» կունպոզիտային նյութի մակրոկառուցվածքը (x200). ա - ձուլումից հետո՝ մինչև տաք արտամղումը, բ – տաք արտամղումից հետո (λ =4), q – տաք արտամղումից հետո (λ =6)

Ինչպես երևում է նկարից, տաք արտամղման ժամանակ թելքերը ոչ միայն դեֆորմացվել են, այլ փակվել են «թելք – մայրակ» բաժանման հարթությունում առկա ձուլման խոռոչները։ Հետազոտությունների արդյունքում պարզվել է, որ անցումային շերտի հաստությունը չի գերազանցում 5 *մկմ*, որով ապացուցվում է անցումային շերտի բարձր մեխանիկական հատկությունների առկայությունը։ **Եզրակացություն։** Կատարված տեսական և փորձարարական հետազոտությունների արդյունքում ընտրվել են «A5E+(4,5...5,5)%Cu+պողպատյա թելքեր» բաղադրությամբ ալյումինային ամրանավորված բարձրամուր դեֆորմացվող համաձուլվածքի ջերմամշակման ռեժիմները. միման ջերմաստիձանը՝ T₄ = 530°*C*, ծերացման ջերմաստիձանը՝ T₈ = 80°*C*, ծերացման տևողությունը՝ τ_8 = 36 *ժամ*, որոնք ապահովում են բարձր մեխանիկական հատկությունների ստացում՝ σ_{d} = 570...580*ՄՆ/մմ*², HB = 1240...1250 *ՄՊա*, δ = 8,5...9,5%. Այսպիսի ռեժիմներով ջերմամշակված համաձուլվածքի միկրոկառուցվածքը ներկայացնում է ալյումինի հիմքով պինդ լուծույթ՝ շրջապատված Al₂Cu և FeAl₃ինտերմետաղական ֆազերով։

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

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- 1. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов.- Изд. 2-е.- М.: Металлургия, 1981.- 416 с.
- 2. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов.- М.: Металлургия, 1979.- 640 с.
- 3. **Иванова В.С., Копьев И.М.** Упрочнение металлов волокнами: Монография.- М.: Наука, 1973.- 207 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան։ Նյութը ներկայացվել է իմբագրություն 21.11.2023։

С.Г. АГБАЛЯН, Г.А. ВАСИЛЯН, А.С. АГБАЛЯН, С.А. АРУТЮНЯН, Н.В. ВАРДАНЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АРМИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ГОРЯЧИМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ

Изучены процессы термической обработки и формирования структуры и свойств армированных стальными волокнами алюминиевых деформируемых литейных сплавов, полученных методом горячего выдавливания. В результате были выбраны оптимальные температуры закалки и старения: $T_3 = 530 \pm 10^{9} C$, $T_{cr} = 80 \pm 10^{9} C$ и продолжительность старения: $\tau_{cr} = 36$ час, которые обеспечивают получение высоких механических свойств: $\sigma_B = 570...580$ *MH*/*м*², HB = 1240...1250 *MПа*, $\delta = 8,5...9,5\%$.

Ключевые слова: литье, стальные волокна, упрочнение, алюминиевый сплав, горячее выдавливание, закалка, старение, твердость, прочность.

S.G. AGBALYAN, G.A. VASILYAN, A.S. AGBALYAN, S.A. ARUTYUNYAN, N.V. VARDANIAN

INVESTIGATING THE THERMAL TREATMENT PROCESSES OF REINFORCED ALUMINUM DEFORMABLE CASTING ALLOYS OBTAINED BY HOT EXTRUSION

The processes of heat treatment and formation of the structure and properties of aluminum deformable casting alloys reinforced with steel fibers obtained by the method of hot extrusion are studied. As a result, optimal tempering and aging temperatures are selected. Tr = $530\pm10^{\circ}$ C, Tag = $80\pm10^{\circ}$ C, the duration of aging. τ ag=36 *hours*, which provide high mechanical properties. σ _T = $570...580 \ MH/m^2$, HB = $1240...1250 \ MPa$, δ = 8.5...9,5%.

Keywords: casting, steel fiber, strengthening, aluminum alloy, hot extrusion, hardening, aging, hardness, strength.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. 2024. Т. LXXVII, N1

УДК 666.942

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.1-21

Б.В. МОВСИСЯН

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ С₁₂А7/СА И ФТОРИДОВ СаF₂ И AIF₃ НА ПРОЦЕСС ГИДРАТАЦИИ И ТВЕРДЕНИЯ ГЛИНОЗЕМИСТОГО ЦЕМЕНТА

Исследовано влияние соотношения $CaOAl_2O_3/12CaO·7Al_2O_3$, AlF_3 и CaF_2 на формирование структуры и фазового состава клинкерных минералов алюминатного цемента в процессе гидратации. Установлено, что после 24 часов гидратации основными гидратированными фазами в изученных цементных камнях являются CAH_{10} , C_2AH_8 , AH_3 . Показано, что введение фторидов AlF_3 и CaF_2 снижает температуру ликвидуса систем и способствует увеличению скорости образования CA. Сканирующей электронной микроскопией выявлено, что процесс гидратации кальциевых алюминатов цемента при низких температурах можно рассматривать как одновременно происходящие реакции.

Ключевые слова: высокоглиноземистый цемент, алюминаты кальция, плавление, кристаллизация, гидратация, термический и фазовый анализ.

Введение. Моноалюминат кальция является основным вяжущим компонентом в клинкере глиноземистого цемента, который отличается наиболее высокими гидратационными и вяжущими свойствами, обеспечивает высокую прочность и быстрое твердение [1]. Следовательно, исходные составы, являющиеся основой клинкерных фаз, расположены в относительно узкой области системы $CaO-Al_2O_3$ [2]. $CaAl_2O_4$ плавится конгруэнтно при 1600 ⁰C, и получение глиноземистого цемента методом спекания неэффективно ввиду малого количества образующейся жидкой фазы и высокой вязкости расплава. Поэтому глиноземистый цемент преимущественно получают методом плавления, в процессе которого инертные оксиды восстанавливаются и не входят в состав клинкера. Реальные клинкерные фазы являются многокомпонентными системами, состоящими из природных минералов, содержащих значительное количество разнородных элементов. Наличие в незначительном количестве других элементов, не изменяющих образование основных кристаллических фаз клинкера, существенно снижает температуру ликвидуса многокомпонентной системы (эффект первых добавок) и температуру образования жидкой фазы [1, 3]. Клинкер глиноземистого цемента, получаемого охлаждением расплава, характеризуется определенным химическим составом и составом клинкерных фаз, формирующихся при различных скоростях охлаждения клинкерного расплава. Основными кристаллическими фазами, представляющими практический интерес в глиноземистых цементах, являются $CA(CaOAl_2O_3)$, $C_{12}A_7(12CaO.7Al2O3)$ и CA_2 ($CaO2Al_2O_3$). Матричные клинкерные соединения могут содержать в кристаллических решетках изоморфные изовалентные и гетеровалентные замещенные катионы и анионы, что характерно при формировании реальных фаз [4, 5]. Выявлено, что наибольшие концентрации примесных элементов локализуются в алюминатных и алюмоферритных фазах (до ~13-15%) ввиду особенностей их кристаллической структуры (одновременное присутствие октаэдрических и тетраэдрических позиций Al^{3+} и Fe^{3+} [6]). В работах выявлено, что при вхождении трехвалентных ионов (Cr^{3+} , Mn^{3+} , Ti^{3+} , Fe^{3+}) в кристаллическую решетку CA ($CaOAl_2O_3$) и CA_2 ($CaO2Al_2O_3$) ускоряются процессы гидратации и повышается прочность бетона из глиноземистого цемента [7].

Постановка задачи и обоснование методики. В настоящей работе приведены результаты исследования процессов гидратации цементов, содержащих до 5,0 масс.% флюсующие добавки - $AlF_3 u CaF_2$ в системе CaO- Al_2O_3 -SiO₂, находящиеся в поле первичной кристаллизации соединений С₁₂А₇, СА с постоянным содержанием 50 масс.% Al_2O_3 и ограниченным постоянным содержанием 10 масс.% SiO₂. Исследованы закономерности процессов фазообразования, теплоты и скорости протекания при гидратации цементов. Представлены результаты исследования микроструктуры цементного камня. Синтез определенных составов проводился двумя способами: твердофазовым синтезом и плавлением шихты в электрической печи Nabertherm P570 в атмосфере воздуха при температуре 1500 ^{0}C в корундовом тигле с продолжительностью 60 *мин*, скорость охлаждения расплава в печи составила ~20 °С мин⁻¹. Для синтеза клинкеров применялись химически чистые вещества (хч) $CaCO_3$, Al_2O_3 , SiO_2 , AlF₃, CaF₂. Дифференциально-термический анализ (ДТА) проводился при нагревании порошков образца в платиновом тигле на дериватографе Q-1500 (эталон-*Al*₂*O*₃), скорость нагрева 10 ^{*0*}*С* мин⁻¹. Гидратацию порошков цементов и тепловой эффект изучали на дериватографе Q-1500. Насыпная плотность порошков ~1100 кг/м³. Пасты готовили путем смешивания цементного порошка с кипяченой дистиллированной водой при *W/C* соотношении 0,5. Рентгенофазовый анализ (РФА) синтезированных материалов и продуктов гидратации цементов проводили на дифрактометре URD 63 с использованием Сика – излучения и никелевого фильтра, скорость регистрации составляла 2 °/мин. Электронно-микроскопические (ЭМ) исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе (SEM) Prisma E(Thermo Fisher Scientific).

Экспериментальная часть и обсуждение результатов. Глиноземистые цементы, в отличие от других цементов, в которых образующиеся фазы и процесс твердения не зависят от времени и температуры гидратации, в процессе гидратации образуют различные кристаллические и аморфные гидраты в зависимости от соотношения W/C, времени отверждения и, главным образом, от температуры [8]. При низких температурах гидратации (ниже 15 °C) образуется САН₁₀, тогда как в интервале температур 15... 27 °С САН₁₀ может сосуществовать с $C_2AH_8 u AH_3$ [8,9]. Состав продуктов гидратации может зависеть от повышения температуры связующей массы за счет тепла, выделяющегося при гидратации. Кинетика превращения зависит от температуры и влажности и связана с особенностями структуры стабильных гидратов и их равномерного распределения в объеме твердеющей массы. Процесс и образующиеся фазы взаимодействия алюминатов кальция с водой изучались многими исследователями [10], и до настоящего времени нет определенных данных об образовании ряда соединений, что, по-видимому, связано с неопределённостью соотношения вяжущего и воды, присутствием углекислого газа, примесей и т.д.

На рис. 1 представлены данные исследований ДТА исходного и образцов шихт, содержащих дополнительно AlF₃ и CaF₂. На кривой ДТА порошка исходного состава (масс%: CaO - 48,0, Al₂O₃ - 48, SiO₂ - 4,0) выраженный эндотермический эффект при 873 ⁰C (кр. 1) обусловлен разложением карбоната кальция CaCO₃. При дальнейшем повышении температуры в широкой области до 1250 ⁰C наблюдается возрастание энергии системы, связанное с процессами спекания частиц компонентов шихты. Полностью система переходит в расплавленное состояние с эндотермическим эффектом при T_L=1420 ⁰C.



Рис. 1. Кривые дифференциально-термического анализа исходных шихт цементов (в масс.%): 1- CaO 48,0, Al₂O₃ 48, SiO₂ 4,0; 2 - сверх 100% 5% AlF₃; 3 - сверх 100 5% CaF₂

Результаты термического анализа порошков, содержащих 5,0% AlF₃ и CaF₂, показывают, что введение фторидов значительно снижает температуру ликвидуса систем (33 ⁰C и 67 ⁰C) и способствует увеличению скорости образования CA при относительно низких температурах. Слабовыраженные эндотермические эффекты на кривых 2 и 3 при 1353⁰C и 1387⁰C связаны с полным плавлением компонентов смеси.

Основными фазами при кристаллизации расплавов цементов являются СА и $C_{12}A_7$ (рис, 2. кр. 1, 3). Результаты РФА образцов цементов, составы которых расположены в поле первичной кристаллизации СА, показывают, что в продуктах кристаллизации превалирует моноалюминат кальция, отличающегося наибольшей интенсивностью дифракционных максимумов. Менее интенсивные максимумы принадлежат соединению $C_{12}A_7$, проявляются также относительно слабые линии, относящиеся к гелениту C_2AS . Результаты изучения фазовых изменений в составе теста, происходящих на ранних стадиях гидратации цемента в условиях низких температур (ниже 15 °C), показали, что образование продуктов гидратации наблюдается в течение первых минут (рис. 2, кр. 1, 3), и происходит увеличение температуры системы и резкое повышение прочности образцов.

Известно, что продукты гидратации цемента с высоким содержанием Al_2O_3 постепенно видоизменяются с образованием новых гидратированных фаз. Взаимодействие алюминатов кальция с водой протекает по близким схемам, и образуются практически одинаковые соединения [10]. Как видно из рентгенограмм, в начальные сроки твердения продуктом гидратации является CAH_{10} , которое в дальнейшем переходит в C_2AH_8 . Соединение $C_{12}A_7$ с водой реагирует активно, схватывается за считанные минуты и в начальный период образует гидроалюминат состава C_2AH_8 , которые, облегая зерна $C_{12}A_7$, затрудняют гидратацию алюмината. В процессе гидратации выделяется также гелеобразный гидроксид алюминия. Взаимодействие геленита C_2AS с водой протекает очень медленно с образованием C_2ASH_8 и практически является инертной примесью. Процесс гидратации компонентов цемента при низких температурах можно рассматривать как одновременно происходящие реакции:

$$CA + 10H = CAH_{10}; C_{12}A_7 + 51H = 6C_2AH_8 + AH_3; C_2AS + 8H = C_2ASH_8.$$



Рис. 2. Рентгенограммы порошков цементов и продуктов их гидратации: 1- цемент, содержащий 5% AlF₃; 2- гидратированный цемент с 5 % AlF, 3- цемент; содержащий 5% CaF₂; 4- гидратированный цемент с 5 % CaF₂

Кристаллизующиеся при гидратации алюминатные фазы глиноземистого цемента срастаются, образуя трехмерный каркас с высокой начальной прочностью. Интересно то обстоятельство, что выделившаяся твердая фаза CAH₁₀ далее распадается на C₂AH₈ и гель Al₂O₃·3H₂O(AH₃) [11].

Из ЭМ снимков (рис.3) видно, что микроструктура превращенных продуктов гидратации представляет собой неравномерные скопления гидроалюминатов кальция, погруженных частично в закристаллизованный аморфный АН₃.

Полностью гидратированные алюминаты при водоцементном отношении 0,5 образуют три типа гидратированных алюминатов. Структура цемента, содержащего фторид алюминия (рис. 3а), представлена плотным скоплением закрученных пластинчатых кристаллов, и при гидратации образуются массивные кристаллы, покрытые аморфной фазой (рис. 3б). Цемент, содержащий CaF₂, представлен игольчатыми и хлопьевидными частицами, при гидратации образуются преимущественно игольчатые частицы.



Рис. 3. ЭМ снимки поверхности излома образцов цементов и затвердевших цементных тестов через 24 часа: а - цемент, содержащий CaF₂; б- затвердевшее тесто с CaF₂; в- цемент, содержащий AlF₃; г- затвердевшее тесто с AlF₃

Заключение. Установлено, что при гидратации алюминатного цемента после 24 часов гидратации основными гидратированными фазами в изученных цементных камнях являются CAH_{10} , C_2AH_8 и AH_3 . Показано, что введение фторидов AlF_3 и CaF_2 снижает температуру ликвидуса систем и способствует увеличению скорости образования CA. Сканирующей электронной микроскопией выявлено, что процесс гидратации кальциевых алюминатов цемента при низких температурах можно рассматривать как одновременно происходящие реакции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Тейлор X. Химия цемента.- М.: Мир, 1996.- 560с.
- 2. Kurdowsky W. Chemia cementa.- Warszawa, 1991.- 479 p.
- 3. **Pöllmann, H.** Calcium Aluminate Cements Raw Materials, Differences, Hydration Properties // Reviews in Mineralogy and Geochemistry.- 2012.- Vol. 74.- P. 1–82.
- Hofmeister A.M., Wopenka B., Locock A.J. Spectroscopy and structure of hibonite, grossite, and CaAl2O4: Implications for astronomical environ- ments // Geochimicaet Cosmochimica Acta.- 2004.- Vol. 68, N. 21.- P. 4485-4503.
- Georgin J.F., Prud'homme E. Hydration modelling of an ettringite-based binder // Cement and Concrete Research.- 2015.- Vol. 76.- P. 51–61, https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.009.

- Krivoborodov Yu., Samchenko S. Synthesis of high alumina cement based on metallurgy wastes // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.- 2019.- Vol. 687, No. 2.- P. 1-7, https://doi.org/10.1088/1757-899X/687/2/022034.
- Nilforoushan, Mohammad Reza; Talebian, Nasrien The Hydration Products of a Refractory Calcium Aluminate Cement at Intermediate Temperatures // Iranian Journal Of Chemistry & Chemical Engineering-International English Edition.- 2007.- Vol. 26.-No.3.- P. 19-24.
- Linderoth O., Wadsö L., Jansen D. Long-term cement hydration studies with isothermal calorimetry // Cement and Concrete Research.- 2021.- Vol. 141, 106344, https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106344.
- John F. Zapataa, Maryory Gomezc, Henry A. Colorado. Structure-property relation and Weibull analysis of calcium aluminate cement pastes // Materials Characterization.-2017.- Vol. 134.- P. 9-17, https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.10.010.
- Kim H., Son H.M., Lee H.K. Review on recent advances in securing the long-term durability of calcium aluminate cement (CAC)-based systems // The Korean Society for Composite Materials and IOP Publishing Lim.- 2021.- Vol. 3, N. 3, https://doi.org/10.1002/adma.201804690.
- Tengfei Fu, Matthew P. Adams, Jason Henry Ideker. A Preliminary Study on Calcium Aluminate Cement Concrete Maturity Theory in Predicting Conversion // The 14th International Congress on the Chemistry of Cement.- 2015, https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2606.5369.

Институт общей и неорганической химии им. М.Г. Манвеляна НАН РА. Материал поступил в редакцию 09.04.2024.

Բ.Վ. ՄՈՎՍԻՍՅԱՆ

C₁₂A7/CA ԵՎ CaF₂, AIF₃ ՖՏՈՐԻԴՆԵՐԻ ՀԱՐԱԲԵՐԱԿՑՈՒԹՅԱՆ ԱՉԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱԼՈՒՄԻՆԱՏԱՅԻՆ ՑԵՄԵՆՏԻ ՀԻԴՐԱՏԱՑՄԱՆ ԵՎ ԱՄՐԱՑՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՎՐԱ

Ուսումնասիրվել է CaO.Al₂O₃/12CaO.7Al₂O₃, AlF₃ և CaF₂ հարաբերակցության ազդեցությունը հիդրատացման գործընթացում ալյումինատային ցեմենտի կլինկերային միներալների բաղադրության և ֆազային կազմի ձևավորման վրա։ Պարզվել է, որ հիդրատացումից 24 ժամ հետո ուսումնասիրված ցեմենտաքարերի հիմնական հիդրատացված ֆազերը հանդիսանում են CAH₁₀, C₂AH₈, AH₃։ ծույց է տրված, որ AlF₃ -ի և CaF₂ -ի ներմուծումը նվազեցնում է համակարգերի լիկվիդուսի ջերմաստիձանը և նպաստում է CA-ի առաջացման արագության բարձրացմանը։ Սկանավորող էլեկտրոնային միկրոսկոպի միջոցով պարզվել է, որ ցածր ջերմաստիձաններում կալցիումի ալյումինատների հիդրատացման գործընթացը կարելի է դիտարկել որպես միաժամանակ ընթացող ռեակցիաներ։

Առանցքային բառեր բարձր ալյումինատային ցեմենտ, կալցիումի ալյումինատներ, հալում, բյուրեղացում, հիդրատում, ջերմային և ֆազային անալիզ։

B.V. MOVSISYAN

THE IMPACT OF THE C₁₂A₇/CA RATIO AND THE FLUORIDE CaF₂ AND AIF₃ ON THE PROCESS OF HYDRATION AND HARDENING OF ALUMINA CEMENT

The effect of the ratio CaO.Al₂O₃/12CaO.7Al₂O₃, AlF₃ and CaF₂ on the formation of the structure and phase composition of clinker minerals of aluminate cement during hydration has been studied. It is found that after 24 hours of hydration, the main hydraulic phases in the studied cement stones are CAH₁₀, C₂AH₈, AH₃. It has been shown that the introduction of AlF₃ and CaF₂ fluorides reduces the liquidus temperature of the systems and increases the rate of CA formation. Scanning electron microscopy has revealed that the process of hydration of calcium aluminates of cement at low temperatures can be considered as simultaneous reactions.

Keywords: high-alumina cement, calcium aluminates, fusion, crystallization, hydration, thermal and phase analysis.

ISSN 0002-306X. ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղ. Տեխն. գիտ. սերիա. 2024. Հ. LXXVII, N1

*Հ*ՏԴ 622.288:622.236.52

ԸՆԴԵՐՔՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՆԵՐ

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.1-29

Լ.Ա. ՄԱՆՈԻԿՅԱՆ, Լ.Ս. ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ

ՀԱՆՔԱԹԵՔԱՏՈՎ ՏԱՐԲԵՐ ԽՈՆԱՎՈՒԹՅԱՄԲ ՀԱՆՔԱՔԱՐԻ ԹՈՂԱՆՑՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ ԲԱՑԱՀԱՆՔԻ ԸՆԴՈՒՆՄԱՆ ՀՐԱՊԱՐԱԿՈՒՄ ԱՊԱՐԱԿՏՈՐՆԵՐԻ ԹՌԻՉՔԻ ՀԵՌԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ՀԻՄՆԱՎՈՐՈՒՄԸ

Լեռնային բացահանքերում հանքաթեքատով հանքաքարի տեղափոխման ժամանակ անհրաժեշտ է հիմնավորել բացահանքի ընդունման հրապարակում հանքաքարի թռիչքի հեռավորությունը՝ կախված հանքաթեքատի թեքությունից և տեղափոխվող զանգվածի խոնավությունից։ Մոդելային հետազոտություններով որոշվել են հանքաթեքատի և տարբեր խոնավությամբ ու չափերով թողանցվող լեռնային զանգվածի միջև արտաքին շփման անկյունները։ Ստացված տվյալներով մշակվել են բացահանքի ընդունման հրապարակում հանքաթեքատով տեղափոխվող տարբեր խոնավությամբ հանքաքարի կտորների թռիչքի հեռավորության որոշման կախվածությունները։

Առանցքային բառեր. հանքաթեքատ, ապարակտորների չափեր, լեռնային զանգված, խոնավություն, ֆիզիկական մոդել, արտաքին շփման անկյուն։

Ներածություն։ Հանքաթեքատով հանքաքարի զանգվածի տեղափոխման մի շարք օրինաչափությունների ուսումնասիրման համար պատրաստված ֆիզիկական մոդելավորման ստենդի վրա կատարված հետազոտությունների արդյունքում առանձնացվել է ապարակտորների շարժման երեք տեսակ [1].

 ապարակտորը կարող է շարժվել, երբ սահքի հարթության թեքությունը գերազանցում է ապարակտորի հետ կազմած արտաքին անկյունը,

- ապարակտորն ունի սկզբնական արագություն,
- գլորման և ցատկաձև շարժման դեպքում։

Ցույց է տրվել, նաև, որ գլորումը հանքաքարի կտորի անկանոն ձևի բարդ շարժում է հանքաթեքատի թեք հարթությունով, ինչը բնութագրվում է թեք հարթության վրա առկա խորդուբորդ մասերին մարմնի հաձախակի հարվածներով և թեք հարթության վրա առկա տարբեր կետերի հետ հպման շուրջ մարմնի պտտական շարժումով (նկ. 1 ա)։

Ցատկաձև շարժումը բնութագրվում է թեք հարթության վրա որոշակի արագությամբ շարժվող մարմնի շեղ հարվածներով։ Մոդելային հետազոտություններով որոշվել է, որ հանքաթեքատի մոդելի հատակի թեքության α_{թեբ} = 40...43⁰ դեպքում ապարակտորները կարող են շարժվել նաև սկզբնական արագության բացակայության դեպքում (նկ. 1 բ)։



Նկ. 1. Հանքաթեքատի մոդելի վրա ապարակտորների շարժման սխեմատիկ պատկերները. ա) գլորում, բ) ցատկաձն շարժում

Բազմաթիվ դիտարկումները ցույց են տվել, որ ապարակտորների շարժումը սկզբում ցատկաձև է, աստիձանաբար այն դառնում է մարող և որոշ ժամանակ անց անցնում է փոքր ցատկերով գլորման [2]։

Հանքաթեքատի մոդելով սորուն նյութերի թողանցման գործընթացի մոդելավորման ժամանակ դիտվել է լեռնային զանգվածի հոսքի ապաինտեգրացում, այսինքն՝ լեռնային զանգվածի տրոհումը առավել մանր չափամասերի, ընդ որում, մեծ կտորների շարժման արագությունը մեծ է փոքրերից [3]։ Նկատվել է նաև ապարակտորների կանգ՝ կախված հանքաթեքատի մոդելի հիմքի կառուցվածքից։

Հանքաթեքատով լեռնային զանգվածի ապարակտորների շարժման արագությունը հաստատուն չէ. նույն երկրաչափական ձև ունեցող ապարային կտորները մի դեպքում կարող են դրական ազդեցություն ունենալ ապարների շարժման արագության վրա, մյուս դեպքում՝ բացասական։

Լեռնալանջերով լեռնային զանգվածի թողանցման ժամանակ, որպես կանոն, մեծ արագություն են զարգացնում կլորավուն և միջին չափերի 50...200 *կգ* զանգվածով ապարակտորները [3]։

Հանքաթեքատով լեռնային զանգվածի ապարակտորների շարժման արագությունն ու հետագիծը կախված են ոչ միայն հանքաթեքատի բարձրությունից և հորիզոնի նկատմամբ ունեցած թեքության անկյունից, այլ նաև տեղափոխվող զանգվածի և հանքաթեքատի հիմքի մակերևույթի միջև եղած շփման ք գործակցից։ Վերջինս պայմանավորված է նաև թողանցվող լեռնային զանգվածում ապարակտորների երկրաչափական ձևերով և չափերով, ինչպես նաև հանքաթեքատի հիմքի նյութի տեսակով [4]։

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը։ Հանքաթեքատով թողանցվող ապարային զանգվածի տարբեր չափերի կտորների արտաքին շփման գործակիցների արժեքները պայմանավորված են հանքաթեքատով թողանցման պրոցեսում տեղափոխվող զանգվածի առանձին չափամասերի բաժանմամբ։ Բացահանքերում հանքա- և ապարաթեքատների կառուցման ժամանակ անհրաժեշտ պայման է դրանց թեքության նվազագույն անկյան պահպանումը, ինչը համապատասխանում է թողանցվող նյութի բնական թեքության անկյանը կամ նյութի և հանքաթեքատի հատակի միջև արտաքին շփման անկյանը։ Սովորաբար, խոնավ, սորուն գրունտների բնական թեքության անկյունը չի գերազանցում 40⁰-ը և փոփոխվում է՝ կախված գրունտների հատիկների խոշորությունից։

Տաք կլիմայական պայմաններ ունեցող վայրերում, որտեղ անձրևային և չոր եղանակները հաջորդում են միմյանց, հանքա- և ապարաթեքատների շահագործման ժամանակ հանքաթեքատի թեքության ռացիոնալ անկյան որոշման ժամանակ անհրաժեշտ է հաշվի առնել թողանցվող լեռնային զանգվածի խոնավությունը։

Պետք է նշել, որ սորուն ապարներում խոնավությունը տարածված է անհամաչափ և կախված է ապարների կտորների չափերից։ Օրինակ, Ռասվումչոր-Ցիրկ բացահանքում ձնածածկի տակ գտնվող հանքաքարի ֆիզիկական հատկությունների ուսումնասիրությունը ցույց է տվել, որ հանքաքարի չափամասերի մեծացման հետ նրանում կտրուկ նվազում է խոնավության պարունակությունը և 50...100 *մմ* չափամասի համար կազմում է 0,18% [5]։ Այստեղ խոնավության հիմնական զանգվածը աոկա է առավել մանր՝ 10...25 *մմ* չափամասերով գրունտներում։

Հետազոտության արդյունքները։ Մեր կողմից կատարված ֆիզիկական մոդելավորման փորձարկումների արդյունքների հիման վրա (աղ. 1) մշակվել են տարբեր խոնավությամբ ապարակտորների մասնիկների և հանքաթեքատի մոդելի հատակի միջև կազմված արտաքին շփման անկյունների միջև կախվածություններ, որոնք ցույց են տրված նկ. 2-ում։

Աղյուսակ 1

Ապարի չափամասը, <i>մմ</i>	Մոդելային ստենդի հանքաթեքատի հիմքի հետ ապարակտորների								
	արտաքին շփման անկյունները, <i>աստ.</i>								
	(nn	զանգվածային խոնավությունը, %							
		4	7	10	14	17			
05	3639	4041	4244	4549	3738	3537			
68	3538	3940	4143	4042	3536	35			
911	3334	3638	3940	3738	3233	33			

Տարբեր խոնավությամբ ապարակտորների մասնիկների և հանքաթեքատի մոդելի հատակի միջև կազմված արտաքին շփման անկյունների միջև կախվածությունները Ապարակտորների խոնավության և հանքաթեքատի մոդելի հատակի միջև արտաքին շփման անկյան կախվածության փոփոխությունը առավել զգալի է դառնում, երբ զանգվածում 1 *մմ* չափերով մասնիկների պարունակությունը բարձր է։ Հայտնի է նաև, որ թողանցվող լեռնային զանգվածի 20...25% խոնավության դեպքում արտաքին շփման անկյունը ստացվում է ավելի փոքր, քան խոնավության լրիվ բացակայության դեպքում [1]։

Հանքաթեքատների շահագործման փորձը ցույց է տվել, որ թողանցվող լեռնային զանգվածում մանր մասնիկների 10...20% չափով պարունակության դեպքում խոնավ հանքաքարի գրավիտացիոն ռացիոնալ թողանցումը հնարավոր է հանքաթեքատի 43...45⁰ թեքության դեպքում։ Այն դեպքում, երբ մանր մասնիկների տոկոսային պարունակությունը զանգվածում հասնում է 50% և ավելի, հանքաթեքատի թեքության անկյունը պետք է լինի ոչ պակաս 50⁰- ից [2, 6]։



Նկ. 2. Տարբեր խոնավությամբ ապարակտորների մասնիկների և հանքաթեքատի մողելի հատակի միջև արտաքին շփման անկյան փոփոխության կախվածությունները

Բացահանքում հանքա- և ապարաթեքատով լեռնային զանգվածի թողանցման ժամանակ տեղի է ունենում ապարակտորների բաժանում ըստ չափերի, որոնք հանքաթեքատի հիմքից դուրս գալուց հետո, բացահանքի ընդունման հրապարակում թռչելով՝ ցրվում են տարբեր ուղղություններով [7]։ Անհրաժեշտ է նշել, որ ֆիզիկական մոդելային հետազոտություններով ստացված ապարակտորների թռիչքի հեռավորությունները բավականին մոտ են հաշվարկային մեթոդով որոշված արժեքներին [3]։ Մոդելային հետազոտություններով ստացված տվյալների հարաբերական շեղումը հաշվարկայինից կազմում է շուրջ 10...20%, ինչը ցույց է տալիս հանքաթեքատով լեռնային զանգվածի թողանցման անվտանգ գոտու չափերի որոշման անալիտիկ արտահայտության բավարար Ճշտությունը [6]։

Ֆիզիկական մոդելում ուղիղ առանցքով հանքաթեքատի տարբերակի դեպքում կատարված հետազոտությունների արդյունքնում բացահանքի ընդունման հրապարակում ապարակտորների թռիչքի հեռավորության որոշված արդյունքները բերված են աղ. 2-ում։ Այդ տվյալների հիման վրա՝ մշակված է ապարակտորների թռիչքի հեռավորության կախվածությունը հանքաթեքատի թեքության անկյունից և երկարությունից (նկ. 3)։

Աղյուսակ 2

			Ապարակտորների թռիչքի հեռավորությունը, <i>մ</i>								
Հանքաթեքատի երկարությունը, մ											
60	90	120	150	180	210	240	250				
39	48	61	68	78	84	89	97				
51	62	75	100	118	123	125	150				
62	77	90	115	146	137	131	164				
y = 3 H	3749x - 7 2 ² = 0.992	1 75.008 23	y = 2.15 $R^2 =$	2 0x - 48.284 = 0.995	3 y = 1 F	9157x - 57. 9157x - 57. 2 ² = 0.9916	566				
20 40 60 80 100 120 140 160 180 Uuuunuuunniitan episeh tahunnieniitan I 1/											
	60 39 51 62 y = 3 F	60 90 39 48 51 62 62 77 y = 3.3749x - 7 R ² = 0.992 0 60 Uuquupulum	60 90 120 39 48 61 51 62 75 62 77 90 1 y = $3.3749x - 75.008$ R ² = 0.9923 1 0 60 80 Uщирициоприкри р 90	120 150 39 48 61 68 51 62 75 100 62 77 90 115 $y = 3.3749x - 75.008$ $y = 2.15$ $R^2 = 0.9923$ $R^2 = 10.9923$	1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 +	1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 +	e^{-1} <t< td=""></t<>				

Բացահանքի ընդունման հրապարակում ապարակտորների թռիչքի հեռավորության որոշված արդյունքները

Ul. 3. Ապարակտորների թռիչքի հեռավորության կախվածությունը մոդելային ստենդում հանքաթեքատի երկարությունից և թեքության անկյունից. 1- մոդելի թեքության անկյունը $\alpha_{d} = 45^{\circ}$; 2- նույնը՝ $\alpha_{d} = 50^{\circ}$; 3- նույնը՝ $\alpha_{d} = 55^{\circ}$: R-ը դետերմինացման գործակիցն է, x-ը՝ հանքաթեքատի հիմքի երկարությունը, մ

Եզրակացություն։ Մոդելային հետազոտությունների արդյունքում մշակված կախվածություններից երևում է, որ ինչքան մեծ են թողանցվող հանքաքարի չափամասերը, այնքան փոքր է մոդելի հիմքի հետ դրանց կազմած արտաքին շփման անկյունը։

Հանքաթեքատի ֆիզիկական մոդելային ստենդով կատարված հետազոտություններով մշակվել են կախվածություններ հանքաթեքատի թեքության անկյան, դրա երկարության և բացահանքի ընդունման հրապարակում ապարկտորների թոիչքի հեռավորությունների միջև։

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- Բալասանյան Լ. Ս. Տեկտոնական խախտումներով թուլացած կողով լեռնային բացահանքում հանքաքարի տեղափոխման ռացիոնալ տեխնոլոգիայի մշակումը։ Սեղմագիր. -Երևան, 2022.- 22 էջ։
- 2. Неу Боннер. Обоснование параметров технологической схемы с породоскатами при открытой разработке нагорных месторождений строительных материалов Камбоджи: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / МГИ. М., 1994. 22 с.
- Ройнишвили Н.М. Защита железнодорожного пути от горных обвалов и осыпей.
 М.: Транспорт, 1973. 304с.
- Карьерные рудоспуски / В.В. Ржевский, А.И. Арсентьев, Р.Ц. Пермяков и др.– М.: Недра, 1969. – 208 с.
- 5. Ржевский В.В., Арсентьев А.И., Ильин С.А. Открытые горные работы в трудных условиях.- М.: Недра, 1964. – 295 с.
- Манукян Л.А., Баласанян Л.С. Модельные исследования влияния размеров кусков пород и влажности на характеристики движения горной массы при перепуске по породоскатам // Сборник статей по материалам LII Международной научнопрактической конференции "Инновационные подходы в современной науке".- М.: Интернаука, 2019.- №16 (52).- С. 38-41.
- Ильин С.А. Технология открытой разработки нагорных месторождений. М.: МГИ, 1991. – Ч. І. – 58 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 27.03.2024։

Л.А. МАНУКЯН, Л.С. БАЛАСАНЯН

ОБОСНОВАНИЕ РАССТОЯНИЯ ПОЛЕТА КУСКОВ РУДЫ НА ПРИЕМНОЙ ПЛОЩАДКЕ КАРЬЕРА ПРИ ПЕРЕПУСКЕ ПО РУДОСКАТУ ГОРНОЙ МАССЫ РАЗНОЙ ВЛАЖНОСТИ

На нагорных карьерах при гравитационном способе перепуска горной массы одним из важных вопросов является установление рационального угла наклона рудоската в зависимости от влажности и размеров кусков породы. В статье приведены результаты модельных исследований для определения величины внешнего угла трения между рудоскатом и горными породами разной влажности и кусковатости. Разработана номограмма для определения дальности полета кусков горной породы в зависимости от длины и угла откоса модели рудоската.

Ключевые слова: рудоскат, размеры кусков породы, горная масса, влажность, физическая модель, угол внешнего трения.

L.A. MANUKYAN, L.S. BALASANYAN

JUSTIFICATION OF THE FLIGHT DISTANCE OF ORE PIECES AT THE RECEIVING SITE OF THE QUARRY AT PASSING OF THE ROCK MASS OF DIFFERENT HUMIDITY THROUGH THE ORE ROLL

One of the important issues in upland quarries with the gravitational method of transferring the rock mass is to establish the rational angle of inclination of the ore roll depending on the humidity and size of the rock pieces. The article presents the results of model studies to determine the value of the external angle of friction between the ore roll and rocks of different moisture content and lumpiness. A nomogram has been developed to determine the flight range of rock pieces depending on the length and repose angle of the ore roll model.

Keywords: physical model, ore roll, moisture of rock mass, lumpiness, angle of external friction.

ISSN 0002-306X. ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղ. Տեխն. գիտ. սերիա. 2024. Հ. LXXVII, N1

*ኢ*SԴ 622.274

ԸՆԴԵՐՔՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՆԵՐ

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.1-36

Գ.Ա. ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ, Վ.Գ. ՀՈՎՄԵՓՅԱՆ

ՊԱՅԹԵՑՄԱՆ ԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ԳՈՐԾՈՂԹՅԱՆ ԿԱՐԳԱՎՈՐՈՒՄԸ ԲԱՑԱՀԱՆՔԻ ՏԱՐԲԵՐ ԲԼՈԿԱՅՆՈՒԹՅԱՄԲ ՀԱՆՔԱՍՏԻՃԱՆՆԵՐԻ ՊԱՅԹԵՑՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

ծույց է տրվել, որ ձեղքավորված միջավայրում զանգվածային պայթեցման դեպքում պայթեցման բեռնավորվածության մեծացումը (պայթուցիկ նյութի տեսակարար ծախսի մեծացումը) չի կարող հանդիսանալ պայթեցված զանգվածի մանրացվածության աստիձանի լավացման հիմնական ուղղություն։ Սահմանվել է, որ պայթեցման էներգիայի գործունեության արդյունավետության բարձրացումը կախված է ձեղքավորված բլոկում պայթուցիկ նյութի (ՊՆ) լիցքի հավասարաչափ տեղաբաշխումից։ ՊՆ-ի բաշխվածության բնութագիրը արտահայտվում է բնական (ապարի ամրություն, զանգվածի բլոկայնություն), էներգետիկ (ՊՆ-ի դետոնացման արագություն, գազագոյացման արգասիքի ձնշում) գործոններով և հորատապայթեցման տեխնոլոգիական պարամետրերով։

Բերված են ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի որոշման փորձա-արդյունաբերական պայթեցման արդյունքները՝ հաշվի առնելով լիցքի տրամագիծը, զանգվածի բլոկայնությունը և ապարի ամրությունը։ Տեսական և փորձարարական տվյալների հիման վրա առաջարկվել է հորատապայթեցման պարամետրերի որոշման նոմոգրամ, որը թույլ է տալիս ձեղքավորված ապարների պայթեցման դեպքում կանխատեսել պայթեցված ապարների մանրացվածությունը։

Առանցքային բառեր. ՊՆ-ի լիցքի կառուցվածք, ՊՆ-ի տեսակարար ծախս, զանգվածի բլոկայնություն, ապարի ամրություն, պայթեցված զանգվածի հատիկաչափային կազմ։

Ներածություն։ Պայթեցման արդյունավետությունը բացահանքերում բնորոշվում է պայթեցման էներգիայի օգտակար գործունեությամբ, որը բացահանքի աշխատանքային հրապարակում կապահովի անհրաժեշտ մանրացվածությամբ և տրված պարամետրերով պայթեցված զանգվածի փլվածք։ Հայտնի է, որ ՊՆ-ի լիցքի քանակի փոփոխությունը և զանգվածում վերջինիս հավասարաչափ բաշխվածությունը համարվում է պայթեցման որակի բարձրացման կարևորագույն գործընթաց։ Մակայն պայթեցման աշխատանքների երկարատև փորձը ցույց է տալիս, որ ՊՆ-ի լիցքի քանակի փոփոխությամբ և վերջինիս հավասարաչափ բաշխվածությամբ, առանց հաշվի առնելու պայթեցվող միջավայրի կառուցվածքային առանձնահատկությունները, ոչ միշտ է հնարավոր ապահովել պայթեցման անհրաժեշտ արդյունքներ [1, 2]։
Նախագծային աշխատանքներում պայթեցման էներգիայի հավասարաչափ բաշխումը (հորատանցքային ցանցի և ՊՆ-ի լիցքի օպտիմալ պարամետրերի ընտրությունը) կատարվում է՝ ըստ ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի սահմանային արժեքների մեծության [3, 4]։

Այս սահմանային արժեքների կիրառումը բացահանքերում իրականացվում է հետևյալ սկզբունքով.

– համաձայն պայթեցման աշխատանքների իրականացման տեխնիկական կանոնակարգի՝ ընտրվում է ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի սահմանային արժեքը.

– -կախված պայթեցվող բլոկի ծավալից և ընտրված ՊՆ-ի տեսակարար ծախսից՝ հաշվարկվում է պայթուցիկ նյութի քանակը.

– ըստ պայթեցվող բլոկի երկրաչափական պարամետրերի՝ կատարվում է պայթուցիկ նյութի բաշխում պայթեցվող բլոկում։

Այս մոտեցումը Ճիշտ է խիստ Ճեղքավորված (մանր բլոկայնությամբ) ապարների դեպքում, երբ զանգվածում Ճեղքավորված ապարների միջին չափերը չեն գերազանցում կոնդիցիոն հատիկայնությունը և մոնոլիտ (չափազանց խոշոր բլոկայնությամբ) միջավայրում, որտեղ էնեգիայի կրողը հանդիսանում է ՊՆ-ի լիցքի քանակը։ Միջին, խոշոր և անհամեմատ խոշոր բլոկայնությամբ ապարներում ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի փոփոխությունը չի կարող ուղիղ համեմատական կախվածությամբ գծայնորեն փոփոխել ապարների մանրացվածության աստիձանը։ Սա պայմանավորված է նրանով, որ ձեղքավորված հանքախորշերի կտրվածքներում միշտ նկատելի են տարբեր ձևերով և չափեով ձեղքեր, որոնք լցված են ցածր ակուստիկ կոշտություն ունեցող միջանկյալ ապարներով կամ օդով (դատարկ տարածություն)։ Միջանկյալ ապարներով լցված ձեղքերի առկայության դեպքում ապարի քայքայման գործընթացն ուղեկցվում է պայթեցման էներգիայի ցրումային կորուստներով։ Օդով լցված ձեղքերի առկայությունը հորատանցքում ՊՆ-ի լիցքի սյան անիրաժեշտ բարձրության ապահովումը կատարվում է ՊՆ-ի զգալի կորուստներով)։

Ուստի ձեղքավորված զանգվածում, կախված կիրառվող ՊՆ-ի տեսակարար ծախսից, պայթեցվող բլոկի ծավալից, միջավայրի ամրության բնութագրից, հնարավոր չէ երկրաչափական լուծմամբ իրականացնել ՊՆ-ի հավասարաչափ բաշխում և այն ընդհանրացնել բոլոր բացահանքերի համար։ Ավելին՝ յուրաքանչյուր հանքավայր ունի ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի իր սահմանային արժեքը, որի մեծությունը հնարավոր է որոշել միայն փորձա-արտադրական եղանակով` պայթեցման արդյունքների հիման վրա։ Հետևում է, որ ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի գործող սահմանային մեծությունները ձեղքավորված միջավայրում ենթակա են փոփոխման, հակառակ դեպքում՝ զանգվածում տեղի կունենա պայթեցման էներգիայի անհավասարաչափ բաշխում, որն էլ կնվազեցնի պայթեցման էներգիայի ակտիվ գործունեությունը ապարի մանրացման դեպքում։

Մի շարք հեղինակներ [5-8] առաջարկել են ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի հաշվարկ՝ որպես ելակետային գործոն ընդունելով ապարի անհրաժեշտ մանրացվածությունը, երբ որոշիչ են զանգվածում Ճեղքավորված ապարների միջին չափերը։ Հեղինակների կողմից առաջարկված այս լուծումներն ունեն տեսական մոտեցումներ, և գործնականում կունենաք սպասվող արդյունքների էական շեղումներ։ Այս դեպքում առաջարկված ՊՆ-ի հաշվարկային տեսակարար ծախսը կհանդիսանա պայթեցման պարամետրերի հաշվարկային տեսակարար ծախսը կհանդիսանա արցեցման պարամետրերի հաշվարկման ուղղորդող սահմանային ցուցանիշ։ Խնդրին գործնական լուծում տալու համար անհրաժեշտ է հեղինակների կողմից առաջարկված այս տեսական լուծումները փորձա-արտադրական պայմաններում իրականացնել հորատապայթեցման օպտիմալ պարամետրերի ընտրությամբ,

Փորձա-արտադրական պայմաններում ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի ուղղորդող սահմանային արժեքը, կախված պայթեցվող բլոկի ձեղքավորվածությունից (բլոկայնությունից), փոփոխվում է մեծ միջակայքով։ Սա վկայում է այն մասին, որ պայթեցման էներգիայի կրողը ձեղքավորված միջավայրում, հատկապես խոշոր և անհամեմատ խոշոր բլոկայնությամբ զանգվածում, հանդիսանում է զանգվածի բլոկայնությունը, և սովորաբար էներգիայի ցրումային կորուստները նման զանգվածում լրացվում են ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի մեծացմամբ՝ հորատանցքային ցանցի խտացման ձանապարհով։

Ապարների քայքայման և տեղաշարժման գործընթացը հանքաստիձանային բլոկի պայթեցման դեպքում պայմանավորված է գազագոյացման արգասիքի Ճնշման և լարվածության ալիքի ներգործությամբ։

Այս մեծությունների սահմանային արժեքները որոշվում են պայթեցման էներգետիկ գործոններից, պայթեցվող միջավայրի կառուցվածքային և ամրության բնութագրից։ Այսինքն պայթեցման էներգիայի օգտակար գործունեությունը բնորոշվում է պայթեցվող միջավայրի և կիրառվող ՊՆ-ի էներգետիկ համապատասխանությամբ և զանգվածում վերջինիս քանակով և հավասարաչափ բաշխվածությամբ։

Իհարկե, ՊՆ-ի հավասարաչափ բաշխվածությունը զանգվածում և վերջինիս էներգետիկ գործոնները (դետոնացման արագությունը, գազագոյացման արգասիքի Ճնշումը հորատանցքի պատին, պայթեցման գործունեության տևողությունը) հորատանցքում անմիջականորեն կախված են ՊՆ-ի լիցքի տրամագծից։ Ուստի ՊՆ-ի հորատապայթեցման օպտիմալ պարամետրերի ընտրումը, կախված զանգվածի բլոկայնությունից, ամրության բնութագրից և հորատանցքի տրամագծից, որը կապահովի պայթեցված զանգվածին կոմպակտ փլվածք՝ անհրաժեշտ մանրացվածությամբ, դառնում է արդիական խնդիր։

Խնդրի դրվածքը և հետազոտության մեթոդները։ Հորատապայթեցման պարամետրերի օպտիմալ մեծությունները կախված են պայթեցվող միջավայրի ելակետային ցուցանիշներից և կիրառվող ՊՆ-ի տեխնիկական բնութագրից, որի էներգետիկ արժեքները կախված են ՊՆ-ի լիցքի տրամագծից։ Այսինքն հորատապայթեցման պարամետրերի հաշվարկ կատարելիս որպես փաստարկ պետք է ընտրել պայթեցվող միջավայրի կառուցվածքային առանձնահատկություննները, ապարի ամրության բնութագիրը և ՊՆ-ի լիցքի տրամագիծը։

Ուստի պայթեցման էներգիայի գործողթյան կարգավորումը պահանջում է լուծել հետևյալ խնդիրները.

– կախված պայթեցվող բլոկի ձեղքավորվածությունից, ապարի ամրության բնութագրից, ՊՆ-ի լիցքի տրամագծից՝ որոշել ՊՆ-ի այն օպտիմալ փաստացի ծախսը, որը կապահովի պայթեցված զանգվածի կանոնակարգված մանրացման բարձր ելք,

– ըստ ընտրված ՊՆ-ի փաստացի ծախսի՝ որոշել հորատանցքային ցանցի պարամետրերը, ՊՆ-ի լիցքի քանակը։

ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի ընտրությունը կատարվել է Քաջարանի պղինձմոլիբդենի, Արարատի կրաքարի, Արամուսի բազալտի, Քարաբերդի գաբրո-դիորիտների բացահանքերում իրականացված փորձա-արտադրական 144 զանգվածային պայթեցումների արդյունքների վերլուծության հիման վրա։ Նշված բացահանքերի մշակվող հորիզոնները ներկայացված են միջին, խոշոր և անհամեմատ խոշոր բլոկայնությամբ։ Ապարի ամրությունը հանքավայրի տարբեր հորիզոններում փոփոխվում է մեծ միջակայքերով (աղ. 1)։

Պայթեցման ելքը բնորոշող ցուցանիշների (պայթեցված զանգվածի մանրացվածությունը և փլվածքի լայնքը) հիման վրա կազմվել է խոշոր բլոկայնության զանգվածներում պայթեցման օպտիմալ պարամետրերի որոշման նոմոգրամ, որը կապահովի անհրաժեշտ կտորայնությամբ և կոմպակտ փլվածքով պայթեցված զանգված (նկ.)։

Աղյուսակ 1

Բացահանքեր	Ապարի տեսակը	Ապարի ամրությունը` ըստ Մ.Մ.Պրոտողյակոնովի	Պայթեցվող տեղամասի բլովայնությունը	Ապարի ծավալային կշիոր, տ/մ ^ց	Հանքաստիճանի բարձրությունը, <i>մ</i>	Հորատանցքի տրասնագիծը, <i>ս՛ս</i>	Հանքաստձանի թեքման անկյունը, <i>աստ</i>
Քաջարանի	օքսիդային և	<i>f</i> =610	Միջին, խոշոր,	2.552.65	15.0	250	5868
	սուլֆիդային հանքաքար	<i>f</i> =1014	անհամեմատ խոշոր				
Արարատի	կրաքար,	<i>f</i> = 48	Միջին, խոշոր,	2.342.68	12.0	180	7075
	մարմարացված	<i>f</i> = 812	անհամեմատ խոշոր				
	կրաքար,						
	տրավերտին						
Արամուսի	բազալտ	f= 610	Միջին, խոշոր,	2.432.75	10.0	140	7278
		<i>f=1216</i>	անհամեմատ խոշոր				
Քարաբերդի	գրանոդիորիտ	f=812	Միջին, խոշոր,	2.652.95	8.0	120	7582
		f=1618	անհամեմատ խոշոր				

Բացահանքերի հանքաստիՃանային բլոկի ելակետային ցուցանիշները

Կախված ՊՆ-ի փաստացի ծախսից՝ ըստ հորատանցքի տրամագծի, ամրության բնութագրից և պայթեցվող տեղամասի բլոկայնությունից որոշվել է պայթեցված զանգվածի ելքը՝ ըստ հատիկայնության, և առաջին շարքի պայթեցված զանգվածի փլվածքի լայնքը (աղ. 2)։

Հետազոտության արդյունքները։ Զանգվածային պայթեցման արդյունքների գնահատման չափանիշներն են պայթեցված զանգվածի մանրացվածության աստիճանը և փլվածքի լայնքը։ Մանրացվածության աստիճանն արտահայտվում է պայթեցված զանգվածի ինտենսիվությամբ, որը բնութագրվում է պայթեցված զանգվածում կտորների առավելագույն չափերով կամ արտաչափս կտորների ելքով և հավասարաչափ մանրացվածությամբ, որն արտահայտում է պայթեցված զանգվածի ելքը՝ ըստ հատիկայնության։ Պայթեցված զանգվածի փլվածքի լայնքն արտահայտվում է պայթեցված զանգվածի առանձին կտորների շպրտման առավելագույն հեռավորությամբ [9]։

Աղ. 2-ում բերված են միջին, խոշոր և անհամեմատ խոշոր բլոկայնությամբ ապարներում իրականացված զանգվածային պայթեցման արդյունքները։ Դրանցից հետևում է, որ ՊՆ-ի միևնույն փաստացի ծախսի դեպքում կոնդիցիոն ֆրակցիաների առավելագույն ելք դիտվում է միջին բլոկայնությամբ ապարներում (86,4%)։ Խոշոր և անհամեմատ խոշոր բլոկայնությամբ ապարներում կոնդիցիոն ֆրակցիաների ելքը համապատասխանաբար կազմում է 84,0% և 78,6%.



Նկ. Խոշոր բլոկայնությամբ զանգվածներում պայթեցման օպտիմալ պարամետրերի որոշման նոմոգրամը

Պայթեցված զանգվածի առանձին կտորների շպրտման հեռավորության առավելագույն մեծություն նկատվում է անհամեմատ խոշոր բլոկայնությամբ ապարներում (20,8 *u*), միջին բլոկայնությամբ ապարներում այն ունի նվազագույն արժեք (15,3 *u*)։

Աղյուսակ 2

ունը	ጣ ըս	Պայթեցված զանգվածի ելքը, (%) ըստ հատիկայնության կազմի (<i>և՛մ)</i>			ո ո ո ո ո ո ո ո ո ո ո ո ո ո ո ո ո ո ո					Պայթեցված զանգվածի փլ- վածքի լայնքը՝ ըստ ՊՆ-ի				
ոլվությո	ցված ներ		ոն ներ		ր ե		1 1	որամս	<i>գգյա</i> նը հանցք] հգծի, <i>ս</i>	ם 1 ע	տես հորա	ւակարս տանցք] ւ	սր ծախ ի տրավ Մ	սի և Լագծի,
սնգվածի բլոկլ	Գերմանրա ֆրակցիա		վնվեղեր ավնիավ		Արտաչա կտորնե	լրույի ալիայի Մ.Մ.Ս	120	140	180	250	120	140	180	250
дu	050	100300	300500	500700	> 700	n								
						610	0.87	0.91	0.95	1.01	14.6	18.6	24.3	35.2
	10.5	37.6	22.4	26.4	3.1	1014	0.96	1.00	1.04	1.10	15.3	21.0	27.4	39.6
						> 14	1.02	1.06		1.17	17.0	23.2		43.8
	10.0	0.45	01.0	00 F	1.0	610	0.72	0.76	0.84	0.87	12.4	17.0	22.9	32.7
.5	10.2	24.5	31.8	29.5	4.0	1014	0.81	0.84	0.92	0.95	14.0	19.2	25.7	36.8
ղջիլ						> 14	0.89	0.95		1.02	15.8	21.9		40.9
5						610	0.61	0.63	0.69	0.72	11.4	15.4	20.7	29.7
	10.0	20.4	32.8	31.5	5.3	1014	0.68	0.71	0.78	0.81	12.9	17.6	23.8	34.0
						> 14	0.79	0.82		0.92	14.9	20.4	10.0	38.8
	10.0	17.0	21.0	22.6	76	610	0.49	0.53	0.57	0.63	10.2	14.2	18.3	27.8
	10.0	17.8	51.0	33.0	7.0	1014	0.58	0.62	0.67	0.73	12.0	16.5	22.6	34.6
						> 14	0.70	0.74	1 10	0.84	14.0	19.3	20.0	37.0
	0.0	22.0	00.0	20.4	<i>.</i> -	610	1.07	1.13	1.19	1.25	17.0	24.0	29.3	39.8
	9.0	32.8	23.3	28.4	6.5	1014	1.14	1.17	1.25	1.28	18.3	25.8	31.5	42.3
						> 14	1.31	1.35	0.00	1.44	21.4	29.2	20.2	49.5
ı'n	0 1	24.2	20.0	20.7	9.7 7.6	010	0.85	0.93	0.90	1.02	15.8	22.3	28.2	30.3
nlel	0.4	24.5	30.0	29.1		1014	0.98	1.05	1.11	1.18	17.8	23.5	31.4	41.8
linı						> 14	1.12	1.18	0.05	1.29	21.0	26.7	27.2	46.8
[m]	86	10.2	25.0	377	86	010	0.73	0.78	0.85	0.88	15.0	21.3	27.2	33.2
lul	0.0	19.2	23.9	57.7	0.0	1014 > 14	1.05	1.09	0.99	1.02	16.2	24.5	29.0	39.0
Чh						6 10	0.61	0.67	0.72	0.77	12.9	10.5	<u></u>	20.9
n2n	8.0	17.4	22.8	41.2	10.6	10 14	0.01	0.07	0.72	0.77	15.8	19.5	25.2	36.4
J.	0.0	17.1	22.0	11.2	10.0	> 14	0.74	0.00	0.04	1.04	18.5	22.0	20.5	42.0
						6 10	0.58	0.55	0.66	0.69	14.4	19.4	23.1	29.8
	7.7	14.3	21.2	44.0	12.8	10 14	0.50	0.05	0.00	0.81	17.3	21.0	25.1	34.8
						> 14	0.76	0.81	0.75	0.93	19.0	23.8	25.0	39.6
						610	1.07	1.13	1.19	1.25	17.0	24.0	29.3	39.8
	7.3	30.4	22.6	28.2	11.5	1014	1.14	1.17	1.25	1.28	18.3	25.8	31.5	42.3
						> 14	1.31	1.35		1.44	21.4	29.2		49.5
						610	1.09	1.12	1.16		19.8	26.3	31.3	
np	7.1	18.8	30.5	30.0	12.6	1014	1.16	1.23	1.26		21.5	27.8	37.4	
2nr						> 14	1.55	1.39	1.45		25.0	30.4	38.3	
ų L						610	0.86	0.92	0.96		17.4	23.5	30.1	
.mj	6.4	16.5	25.0	37.1	15.1	1014	0.98	1.03	1.09		20.8	29.0	32.7	
uſĿ						> 14	1.12	1.18	1.23		24.8	31.6	35.7	
hu						610	0.74	0.8	0.86		20.5	25.4	29.8	
Цl	6.1	15.0	21.0	40.3	17.6	1014	0.85	0.91	0.97		19.3	25.0	31.3	
						> 14	1.01	1.07	1.13		23.0	27.8	33.8	
						610	0.61	0.66	0.72		16.6	20.4	25.8	
	4.8	13.5	14.1	45.8	20.6	1014	0.73	0.79	0.85		18.2	23.3	29.6	
						> 14	0.88	0.94	0.99		20.4	25.5	33.4	

Պայթեցված զանգվածի հատիկայնության կազմը՝ կախված ՊՆ-ի տեսակարար ծախսից, զանգվածի բլոկայնությունից և հորատանցքի տրամագծից

Աղ. 2-ի վերլուծության արդյունքում սահմանվել է ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի սահմանային արժեքը տարբեր բլոկայնությամբ ապարների դեպքում (աղ. 3)։

Աղյուսակ 3

Զանգվածի	Ապարի ամրությունը ըստ	ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի		
բլոկայնությունը	Մ.Մ. Պրոտոդյակոնովի	սահմանային արժեքը		
	<i>f</i> = 8 10	0.600.70		
Միջին բլոկայնությամբ	<i>f</i> = 10 14	0.650.75		
	<i>f</i> >14	0.800.85		
	<i>f</i> = 8 10	0.750.80		
Խոշոր բլոկայնությամբ	<i>f</i> = 10 14	0.900.95		
	<i>f</i> >14	1.001.05		
IIIshuufhufuun hunann	<i>f</i> = 8 10	0.850.90		
	<i>f</i> = 10 14	0.951.05		
բլոգայսությասբ	<i>f</i> >14	1.101.15		

ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի սահմանային արժեքը՝ ըստ պայթեցվող զանգվածի բլոկայնության

Եզրակացություն. ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի սահմանային արժեքը տարբեր բլոկայնությամբ ապարներում տարբեր է.

• ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի սահմանային արժեքը միննույն բլոկայնությամբ ապարներում կախված է ապարների պայթելիության ցուցանիշից և ՊՆ-ի լիցքի տրամագծից։

 Միջին բլոկայնությամբ ապարներում մանրացվածության ելքը բնորոշող գործոնը համարվում է զանգվածում կոնդիցիոն կտորների պարունակությունը։

 Խոշոր և անհամեմատ խոշոր բլոկայնությամբ զանգվածներում ապարի քայքայման և տեղաշարժման գործընթացը տեղի է ունենում պայթեցման գազագոյացման արգասիքի Ճնշման ներգործության (մխոցային ներգործության) ներքո, որն ուղեկցվում է ապարի նվազագույն քայքայման և քայքայված զանգվածի առավելագույն տեղաշարժման գործընթացով։

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- 1. Буровзрывные работы на угольных разрезах / Н.Я. Репин, В.П. Богатырев, В.Д. Буткин и др. М.: Недра, 1982.- 248 с.
- Агаронян Г.А., Агаронян А.Г. Исследование влияния прочностных свойств и структурных особенностей массива на эффективность взрывных работ на карьерах // Вестник Национального политехнического университета Армении: Металлургия, материаловедение, недропользование.- Ереван, 2019.– N 2.- C. 104-115.

- 3. Авдеев Ф.А., Барон В.Л., Гуров Н.В., Кантор В.Х. Нормативный справочник по буровзрывным работам.- 5-е изд., перераб. и доп.- М.: Недра, 1986. 511 с.
- 4. ГЭСН 81-02-03-2001 Государственные элементные сметные нормы на строительные работы ГЭСН -2001, сб. № 3 Госстрой России. –М., 2001.- 54с.
- 5. Кутузов Б.Н., Рубцов В.К. Физика взрывного разрушения горных пород. М.: МГИ, 1970. -182 с.
- 6. **Кузнецов В.М.** Математические модели взрывного дела.- Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1977.- 259 с.
- Kuznetsov V.M. The mean diameter of fragments formed by blasting rock // Soviet Mining Science. - 1973. - Vol. 2.- P. 144-148.
- Cunningham C.V. Fragmentation esitimtaion and the Kuz-Ram model- four years on // Proc. 2nd Int. Symp on Rock Fragmentation by blasting.- 1987. - P.475-478.
- Chakraborty A.K., Riana A.K., Ramulu M.A. Parametric study to develop guidelines for blats fragmentation improvement in join ted and massive formations // Eng. Geol.-2004. - P. 105-116.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան։ Նյութը ներկայացվել խմբագրություն 21.12.2023։

Г.А. АГАРОНЯН, В.Г. ОВСЕПЯН

РЕГУЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА ПРИ ОТБОЙКЕ УСТУПОВ КАРЬЕРА РАЗЛИЧНОЙ БЛОЧНОСТИ

Показано, что увеличение взрывного нагружения (увеличение удельного расхода взрывчатых веществ - ВВ) при массовом взрыве в трещиноватой (блочной) среде не может служить основным направлением для улучшения степени дробления взорванной массы. Установлено, что повышение эффективности действия энергии взрыва зависит от равномерности распределения заряда ВВ в трещиноватом блоке. Характер распределения заряда ВВ в блочном массиве выражается природными (прочность породы, блочность массива), энергетическими (скорость детонации ВВ, давление газообразных продуктов ВВ) факторами и технологическими параметрами буровзрывных работ.

Приведены результаты опытно-промышленных взрывов по определению удельного расхода BB с учетом диаметра заряда, блочности массива и прочности пород. На основе теоретических и экспериментальных данных предложена номограмма для определения параметров буровзрывных работ, позволяющих при взрыве в трещиноватом массиве прогнозировать качество дробления горных пород.

Ключевые слова: конструкция заряда ВВ, удельный расход ВВ, блочность массива, прочность породы, гранулометрический состав взорванной массы.

G.A. AHARONYAN, V.G. HOVSEPYAN

REGULATION OF THE EXPLOSION ENERGY ACTIVITY AT EXPLOSION OF MINES OF DIFFERENT OCCUPANCY BLOCKS

It has been shown that in the case of mass explosion in a fractured environment, increasing the explosion load (increasing the specific cost of the explosive material) cannot be the main way to improve the degree of fragmentation of the exploded mass. Is is determined that the increase in the efficiency of the blasting energy activity depends on the even distribution of the charge of the explosive material (EM) in the cracked block. The characteristic of the distribution of EM is expressed by natural (rock strength, blockiness of the mass), energy (speed of detonation of the EM, pressure of the gas formation) factors and technological parameters of drilling.

The results of experimental-industrial blasting for determining the specific cost of EM are given, taking into account the diameter of the charge, the blockiness of the mass and the strength of the rock. Based on theoretical and experimental data, a nomogram for determining the drilling parameters is proposed, which allows predicting the crushing of blasted rocks in case of blasting of fractured rocks.

Keywords: structure of the explosive charge, specific consumption of the explosive, blockiness of the mass, strength of the rock, composition of the granularity of the exploded mass.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. 2024. Т. LXXVII, N1

УДК 621.372.852

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.1-46

Т.А. ГРИГОРЯН, М.Ц. АЙВАЗЯН

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Вопросы автоматического обнаружения и распознавания цифровых модулированных сигналов становятся все более актуальными в современных системах связи. Эти процессы играют ключевую роль в обеспечении надежной и эффективной связи в самых разнообразных областях - от мобильной связи до радиовещательных и спутниковых систем. Важность этих процессов продолжает расти с увеличением объема данных, передаваемых через эти системы, и с развитием новых технологий связи.

Точное обнаружение и классификация сигналов позволяют системам связи корректно интерпретировать передаваемую информацию, что, в свою очередь, обеспечивает надежность и эффективность передачи данных. Это особенно важно в условиях, когда сигналы подвержены различным видам помех и искажений. Поэтому разработка и улучшение методов автоматического обнаружения и распознавания становятся все более важными для обеспечения высокого качества связи.

Представлена система, основанная на нейронной сети, способная автоматически обнаруживать сигналы с одной несущей частотой в диапазоне до 6 ГГц и классифицировать четыре типа цифровых модулированных сигналов: BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM. Система способна работать при наличии аддитивного белого гауссовского шума, сдвига фазы и частоты в принимаемом сигнале.

В статье представлены алгоритмы обнаружения и распознавания сигналов, разработанные в программной среде LabVIEW. Описаны архитектура и гиперпараметры нейронной сети, которые позволяют быстро и эффективно обучать сеть. Эти алгоритмы и методы обучения могут быть применены и адаптированы для других систем и приложений, что делает их очень полезными для широкого круга задач. Система была протестирована как на моделируемых сигналах, так и в реальном канале связи. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенных методов и подчеркивают их потенциал для дальнейшего применения и исследований.

Ключевые слова: спектр сигнала, автоматическое распознавание цифровой модуляции, нейронная сеть, аддитивный белый гауссовский шум, сдвиг фазы, сдвиг частоты.

Введение. На протяжении многих лет в области автоматического распознавания модуляции доминировали два типичных подхода: теоретико-

решающий и подход распознавания образов. Теоретико-решающий подход использует вероятностные или функции правдоподобия [1], в то время как подход распознавания образов использует методы, основанные на информативных признаках сигнала [2]. Несмотря на то, что теоретико-решающий подход может обеспечить оптимальные решения, он часто нуждается в значительных вычислительных ресурсах. В отличие от этого, правильно спроектированный метод, основанный на информативных признаках, может достичь производительности, сопоставимой с теоретико-решающим методом, существенно снижая вычислительную сложность. Метод распознавания образов делит процесс классификации на две составляющие: подсистему извлечения признаков и подсистему распознавания образов. Роль подсистемы извлечения признаков заключается в извлечении ключевых информативных признаков из принятого сигнала, тем самым уменьшая объем данных, обрабатываемых в подсистеме распознавания образов. В последние годы было много успешных попыток использовать искусственные нейронные сети в подсистеме распознавания образов [3,4].

Эти два подхода были тщательно изучены и представляют собой ценные знания в области автоматического распознавания модуляции. Однако многие существующие исследования и методы не учитывают наличие фазового сдвига в принимаемых сигналах, что может привести к ошибкам классификации и снижению эффективности в реальных каналах связи.

Целью данной работы является разработка системы для автоматического обнаружения и распознавания цифровых модулированных сигналов, способной эффективно функционировать при наличии аддитивного белого гауссовского шума, сдвига фазы и частоты в сигнале. Для реализации системы был выбран метод распознавания образов, а в качестве классификатора в подсистеме распознавания образов использовалась нейронная сеть прямого распространения.

Извлечение признаков. В области автоматического распознавания цифровой модуляции информативные признаки сигнала обычно классифицируются на два основных типа: мгновенные временные признаки и статистические признаки. Первые получают из мгновенной амплитуды, фазы и частоты сигнала, вторые - с использованием моментов высшего порядка, кумулянтов и циклических кумулянтов. Некоторые исследования используют оба типа признаков для улучшения алгоритмов распознавания.

В данной статье используется набор признаков, вычисленных из мгновенной амплитуды и фазы сигнала. Набор признаков, предложенный в [5], служит основой для многих исследований, использующих мгновенные временные признаки для алгоритмов распознавания цифровой модуляции. Нами предложено шесть новых признаков в дополнение к σ_{pcnl} [5]. Два из этих признаков представляют собой модифицированные версии σ_{aa} и μ_{42}^{a} .

Предложенные признаки, которые вычисляются на основе мгновенной амплитуды, определяются следующим образом:

• стандартное отклонение нормализованной мгновенной амплитуды:

$$\sigma_{an} = \sqrt{\frac{\sum (a_n(i) - \mu_{an})^2}{n-1}},\tag{1}$$

где *n* - количество выборок; μ_{an} - среднее значение нормализованной мгновенной амплитуды (равно 1);

коэффициент асимметрии нормализованной мгновенной амплитуды:

$$S_{an} = \frac{\sum (a_n(i) - \mu_{an})^3}{n \,\sigma_{an}^3}; \tag{2}$$

• среднее значение абсолютного значения нормализованной центрированной мгновенной амплитуды:

$$\mu_{anc} = \frac{1}{n} \sum |a_{nc}(i)|, \tag{3}$$

где $a_{nc}(i)$ - нормализованная центрированная мгновенная амплитуда, которая определяется следующим образом;

$$a_{nc}(i) = a_n(i) - 1;$$
 (4)

• коэффициент асимметрии абсолютного значения нормализованной центрированной мгновенной амплитуды:

$$S_{anc} = \frac{\sum (|a_{nc}(i)| - \mu_{anc})^3}{n \,\sigma_{anc}^3},\tag{5}$$

где σ_{anc} - стандартное отклонение абсолютного значения нормализованной центрированной мгновенной амплитуды;

• коэффициент эксцесса абсолютного значения нормализованной центрированной мгновенной амплитуды:

$$K_{anc} = \frac{\sum \left(|a_{nc}(i)| - \mu_{a_{nc}}\right)^4}{n \,\sigma_{anc}^4}.\tag{6}$$

Предложенные признаки, которые вычисляются на основе мгновенной фазы, определяются следующим образом:

• среднее значение абсолютного значения центрированной нелинейной компоненты мгновенной фазы:

$$\mu_{pcnl} = \frac{1}{n} \sum |\varphi_{cnl}(i)|, \tag{7}$$

где $\varphi_{cnl}(i)$ - центрированная нелинейная компонента мгновенной фазы;

• стандартное отклонение абсолютного значения центрированной нелинейной компоненты мгновенной фазы:

$$\sigma_{pcnl} = \sqrt{\frac{1}{n} \left[\sum \varphi_{cnl}^2(i) \right] - \left[\frac{1}{n} \sum |\varphi_{cnl}(i)| \right]^2}.$$
(8)

Модуляции 16-QAM и 64-QAM можно классифицировать по набору признаков σ_{an} , S_{an} , μ_{anc} , S_{anc} и K_{anc} . Однако классификация типов модуляции QPSK и BPSK не может быть достигнута с помощью этих пяти характеристик.

Набор признаков, вычисленных из мгновенной фазы сигнала (μ_{pcnl} и σ_{pcnl}), может быть использован для классификации типов модуляции QPSK и BPSK. Классификация межклассовой модуляции может быть достигнута только путем комбинирования семи характеристик, описанных выше.

Сдвиг фазы сигнала влияет только на два признака из описанного выше набора: μ_{pcnl} и σ_{pcnl} . Несмотря на это, эти признаки по-прежнему применимы для распознавания типов модуляции. Это связано с тем, что значения этих признаков для типов модуляции QPSK и BPSK попадают в отдельные диапазоны (без какого-либо перекрытия) и могут быть различимы на протяжении всего цикла сдвига фазы (рис.1).



Рис.1. Значение μ_{pcnl} в зависимости от сдвига фазы φ_c для сигналов QPSK и BPSK при SNR = 7 дБ

Тестирование нейронной сети. Каждая нейронная сеть состоит из входных, выходных и скрытых слоев. Набор признаков, определенных в предыдущем разделе, используется в качестве входных данных для нейронной сети. Выходной слой нейронной сети определяется на основе количества типов модуляции, которые необходимо классифицировать. Оптимальное количество скрытых слоев и нейронов было определено в ходе экспериментов.

Для проведения экспериментов распознавания использовалась нейронная сеть, ранее описанная в [6]. На основе результатов экспериментов была выбрана архитектура нейронной сети с двумя скрытыми слоями, каждый из которых содержит четырнадцать нейронов.

Для каждого типа модуляции в программной среде LabVIEW было сгенерировано 500 низкочастотно эквивалентных сигналов со случайным отношением сигнал/шум в диапазоне от 6 до 30 ∂S и случайным фазовым сдвигом в диапазоне от 0 до 45 градусов.

Эксперименты показали, что процесс обучения сети становится значительно сложнее, когда нижний предел отношения сигнал/шум для генерируемых сигналов составляет 5 ∂E или меньше. Даже если сеть была обучена на таких данных, классификация модулированных сигналов 16-QAM и 64-QAM с отношением сигнал/шум = 5 ∂E или ниже становится невозможной. Сеть рассматривает их как один и тот же тип модуляции и дает вероятность распознавания около 99% для одного из них и вероятность распознавания около 0...1% для другого. Это происходит потому, что значения ключевых признаков, рассчитанных для классификации сигналов 16-QAM и 64-QAM, начинают перекрывать друг друга при значении отношения сигнал/шум 5 ∂E и ниже (рис.2). Из-за этого было принято решение обучать сеть, используя сигналы с отношением сигнал/шум в диапазоне от 6 до 30 ∂E .



Рис. 2. Значение S_{anc} для 100 смоделированных сигналов при SNR = 5 дБ

Диапазон сдвига фазы был выбран от 0 до 45 градусов, поскольку значение μ_{pcnl} в этом диапазоне охватывает все значения, присутствующие на протяжении всего цикла сдвига фазы (рис.1).

После каждой эпохи, прошедшей в нейронной сети, вычисляется среднеквадратическая ошибка сети. Если она становится меньше 0.01, то сеть считается обученной:

$$\delta_{RMS} = \sqrt{\frac{\Sigma \left(\frac{\Sigma \,\delta m}{m}\right)^2}{n}},\tag{9}$$

где m - количество выходных нейронов; δ_m - значение ошибки m -го выходного нейрона; n - размер обучающих данных.

Для теста распознавания было сгенерировано 1000 сигналов для каждого типа модуляции при указанном значении сигнал/шум. Смещение фазы начиналось с 0 градусов и увеличивалось на один градус с каждым сгенерированным сигналом. В конце была рассчитана средняя вероятность распознавания. Результаты теста распознавания представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сигнал/шум, ∂Б	BPSK, %	QPSK, %	16-QAM, %	64-QAM, %
30	98.17	99.55	99.15	98.89
20	98.15	99.55	99.15	98.81
15	97.41	99.54	99.14	98.9
10	97.35	99.44	99.11	99.17
7	97.79	97.08	99.03	99.15
6	97.94	91.51	32.59	99.1

Результаты распознавания цифровых модуляций смоделированными сигналами

При SNR = 6 ∂E вероятность распознавания модуляции 16-QAM резко падает до ~30%, но сеть все еще способна классифицировать модуляции BPSK и QPSK с высокой вероятностью (табл. 1).



Рис.3. Сигнальные созвездия сгенерированных сигналов 16-QAM и 64-QAM при $SNR = 6 \ \partial E \ u \ \varphi_c = 35^{\circ}$

Высокая вероятность распознавания модуляции 64-QAM в сочетании с низкой вероятностью распознавания модуляции 16-QAM при SNR = 6 ∂E

указывает на то, что сеть не способна классифицировать модуляции 16-QAM и 64-QAM при данном значении сигнал/шум (рис.3). Для значений сигнал/шум больше 6 *дБ* сеть классифицирует все рассмотренные типы модуляции с высокой вероятностью распознавания, независимо от значения фазового сдвига.

Тестирование системы. Для тестирования алгоритмов распознавания цифровой модуляции в реальном канале связи была собрана система на базе приемопередатчика PXIe-5841 от компании NI (National Instruments). Приемопередатчик PXIe-5841 состоит из генератора и анализатора векторных сигналов с диапазоном частот от 9 $\kappa \Gamma u$ до 6 $\Gamma \Gamma u$ и полосой пропускания до 1 $\Gamma \Gamma u$. К приемопередатчику подключены две антенны типа Вивальди с коэффициентом усиления 5 ∂E и с шириной главного лепестка диаграммы направленности ~45 градусов (рис.4).



Рис.4. Система обнаружения и распознавания цифровых модулированных сигналов на базе PXIe-5841

В программной среде LabVIEW был разработан блок передачи цифровых модулированных сигналов BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM. Сигнал передавался на несущей частоте 2.4 *ГГц*, при этом частота выборки IQ данных была 500 *кГц* (рис.5):

$$IQ Rate = Symbol Rate \times Samples Per Symbol.$$
(10)

Для реализации алгоритма обнаружения несущей частоты сигнала был применен инструментарий RFmx SpecAn (LabVIEW). Перед началом процесса поиска несущей частоты сигнала необходимо задать начальную и конечную частоту поиска. По завершении поиска программа определяет и выдает несущую частоту сигнала, которая имеет наибольшую мощность в заданном диапазоне частот. Однако для корректного приема сигнала недостаточно иметь только информацию о несущей частоте. Также необходимо иметь хотя бы приблизительное значение частоты выборки IQ данных. Для оценки значения частоты выборки IQ данных использовалась его связь с занимаемой полосой пропускания сигнала (рис. 6):

$$IQ Rate = 1.25 \times Occupied Bandwidth.$$
(11)

В конечном итоге блоки обнаружения несущей частоты сигнала, оценки значения частоты выборки IQ данных и распознавания цифровой модуляции были интегрированы в блок приёма сигнала (рис.6). Результаты теста распознавания при использовании реального канала связи и без сдвига частоты в сигнале представлены в табл. 2 (отношение сигнал/шум рассчитывалось при передаче сигнала).



Рис.5. Интерфейс программы передачи цифровых модулированных сигналов

Таблица 2

Сигнал/шум, дБ	BPSK, %	QPSK, %	16-QAM, %	64-QAM, %
30	99.46	99.64	99.96	99.01
20	99.45	99.64	99.96	99.03
15	99.45	99.64	99.96	99.02
10	99.45	99.63	99.95	99.02
7	99.58	99.53	94.68	99.01

Результаты распознавания цифровых модуляций с реальным каналом связи (без сдвига частоты в сигнале)

Поскольку при обнаружении несущей частоты могут возникнуть ошибки оценки, было исследовано влияние сдвига частоты в сигнале на точность

распознавания (рис.7). В результате экспериментов выяснилось, что допустимый предел сдвига частоты в сигнале, при котором система останется работоспособной, примерно равен $\pm 1Q$ Rate/2.2. Однако, независимо от значения сдвига частоты в сигнале, система не может отличить модуляцию BPSK от QPSK, поскольку созвездие сигнала будет вращаться, и при нормализации оба сигнала станут идентичными. Результаты теста распознавания с максимальным допустимым сдвигом частоты в сигнале (225 $\kappa \Gamma q$) при текущих настройках системы представлены в табл. 3.



Рис.6. Интерфейс программы обнаружения и распознавания цифровых модулированных сигналов



Рис.7. Распознанный сигнал с модуляцией 16-QAM при SNR = 30 дБ и со сдвигом частоты в сигнале 5 кГц

Таблица 3

Сигнал/шум, дБ	QPSK, %	16-QAM, %	64-QAM, %
30	99.53	99.69	98.98
20	99.52	98.33	99.00
15	99.52	97.28	98.99
10	99.52	95.51	98.99
8	99.52	79.73	98.99

Результаты распознавания цифровых модуляций с реальным каналом связи (с максимальным допустимым сдвигом частоты в сигнале)

Заключение. Автоматическое распознавание типа цифровой модуляции является важной и сложной задачей в современных системах связи. Корректная работа такой системы обеспечивает возможность надежной работы комплекса приемопередатчика или правильного взаимодействия с нежелательными источниками излучения.

В данной работе представлен метод подстройки системы обнаружения и распознавания цифровых модулированных сигналов на основе нейронной сети. Предложен метод расчета набора информативных признаков сигнала, с помощью которого можно осуществлять высокоточное распознавание цифровых модуляций при наличии в сигнале аддитивного белого гаусовского шума, сдвига фазы и частоты. Система и алгоритмы распознавания были протестированы с помощью симуляции сигналов и на реальном канале связи. Результаты тестирования подтвердили работоспособность и высокую точность системы.

Полученные результаты приносят ценный опыт и открывают новые перспективы для будущих исследований в этой области.

Работа выполнена при поддержке Комитета по высшему образованию и науке РА в рамках научно-исследовательского проекта № 21Т-2В028.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Xu J.L., Wei Su, Mengchu Z. Likelihood-Ratio Approaches to Automatic Modulation Classification // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews. - 2011.- Vol. 41. - P. 455-469.
- Dobre O. A., Abdi A., Bar-Ness Y., Su W. Survey of automatic modulation classification techniques: Classical approaches and new trends // IET Comm. - 2007.- Vol. 1.- P. 137-156.
- 3. Xie S., Ye J. Overview of Automatic Modulation Recognition Methods // 2023 International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE).- Ballar, India, 2023.- P. 1-7.
- Jassim S.A., Khider I. Comparison of Automatic Modulation Classification Techniques // Journal of Communications. - July 2022.- Vol. 17, no. 7.- P. 574-580.

- Nandi A.K., Azzouz E.E. Algorithms for Automatic Modulation Recognition of Communication Signals // IEEE Trans. Commun. - 1998.- Vol. 46.- P. 431-436.
- Григорян Т.А., Степанян А.Г., Хачатрян Л.Х. Автоматическое распознавание типа сигнала с использованием циклического метода управления скоростью обучения нейронной сети // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника.- 2021.- N2.- С. 78-86.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 18.03.2024.

Տ.Ա. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Մ.Ց. ԱՅՎԱՉՅԱՆ

ՆԵՅՐՈՆԱՅԻՆ ՑԱՆՅԻ ՄԻՋՈՑՈՎ ԹՎԱՅԻՆ ՄՈԴՈՒԼԱՑՎԱԾ ԱՋԴԱՆՇԱՆԻ ԱՎՏՈՄԱՏ ՀԱՅՏՆԱԲԵՐՈՒՄԸ ԵՎ ՃԱՆԱՉՈՒՄԸ

Թվային մոդուլացված ազդանշանների ավտոմատ հայտնաբերումն ու ձանաչումը գնալով էլ ավելի արդիական է դառնում ժամանակակից կապի համակարգերում։ Այս գործընթացներն առանցքային դեր են խաղում տարբեր ոլորտներում հուսալի և արդյունավետ հաղորդակցություն ապահովելու համար՝ բջջային կապից մինչև ռադիոհեռարձակում և արբանյակային համակարգեր։ Դրանց կարևորությունը շարունակում է աձել կապի համակարգերի միջոցով փոխանցվող տվյալների աձող ծավալի և հաղորդակցության նոր տեխնոլոգիաների զարգացման հետ մեկտեղ։

Ազդանշանների ձշգրիտ հայտնաբերումը և դասակարգումը թույլ է տալիս, որ կապի համակարգերը ձիշտ մեկնաբանեն փոխանցված տեղեկությունը, որն իր հերթին ապահովում է տվյալների հուսալի և արդյունավետ փոխանցում։ Սա հատկապես կարևոր է այն միջավայրերում, որտեղ ազդանշանները ենթակա են տարբեր տեսակի միջամտությունների և աղավաղումների։ Հետևաբար, ավտոմատ հայտնաբերման և ձանաչման մեթոդների մշակումն ու կատարելագործումը գնալով ավելի կարևոր է դառնում բարձրորակ հաղորդակցություն ապահովելու համար։

Այս աշխատանքում ներկայացված է նեյրոնային ցանցի հիման վրա կառուցված համակարգ, որը կարող է ավտոմատ կերպով հայտնաբերել մինչև 6 *ԳՀց* տիրույթում գտնվող և մեկ կրող հաձախություն ունեցող ազդանշաններ և դասակարգել թվային մոդուլավորված ազդանշանների չորս տեսակ՝ BPSK, QPSK, 16-QAM և 64-QAM։ Համակարգն ի վիձակի է աշխատելու ընդունված ազդանշանի վրա հավելումային գաուսյան սպիտակ աղմուկի, փուլային և հաձախականային շեղման առկայության դեպքում։

Աշխատանքում ներկայացված են LabVIEW ծրագրային միջավայրում մշակված ազդանշանների հայտնաբերման և ձանաչման ալգորիթմները։ Նկարագրված են նեյրոնային ցանցի ձարտարապետությունը և հիպերպարամետրերը, որոնք թույլ են տալիս արագ և արդյունավետ ուսուցանել ցանցը։ Այս ալգորիթմները և ուսուցման մեթոդները կարող են հարմարեցվել և կիրառվել այլ համակարգերի և հավելվածների հետ՝ դրանք օգտակար դարձնելով առաջադրանքների կատարման լայն շրջանակում։ Համակարգը փորձարկվել է ինչպես մոդելավորված ազդանշանների, այնպես էլ իրական կապուղիում։ Աշխատանքում ներկայացված են նաև համակարգի թեստավորման արդյունքները։ Այս արդյունքները հաստատում են առաջարկվող մեթոդների արդյունավետությունը և ընդգծում դրանց ներուժը հետագա կիրառման և հետազոտության համար։

Առանցքային բառեր. ազդանշանի սպեկտր, թվային մոդուլյացիայի ավտոմատ ձանաչում, նեյրոնային ցանց, հավելումային գաուսյան սպիտակ աղմուկ, փուլային շեղում, հաձախականային շեղում։

T.A. GRIGORYAN, M.TS. AIVAZYAN

AUTOMATIC DETECTION AND RECOGNITION OF DIGITAL MODULATED SIGNALS USING A NEURAL NETWORK

Issues on automatic detection and recognition of digital modulated signals are becoming increasingly relevant in modern communication systems. These processes play a key role in ensuring reliable and efficient communication in a wide range of areas, from mobile communication to broadcasting and satellite systems. The importance of these processes continues to grow with the increase in the amount of data transmitted through these systems and with the development of new communication technologies.

Accurate detection and classification of signals allow communication systems to correctly interpret the transmitted information, which, in turn, ensures the reliability and efficiency of data transmission. This is especially important in conditions when signals are subject to various types of interference and distortions. Therefore, the development and improvement of the methods for automatic detection and recognition are becoming increasingly important for ensuring high-quality communication.

The present article presents a neural network-based system capable of automatically detecting signals with a single carrier frequency in the range up to 6 *GHz* and classifying four types of digitally modulated signals: BPSK, QPSK, 16-QAM, and 64-QAM. The system is capable of operating in the presence of additive white Gaussian noise, phase and frequency offset in the received signal.

The algorithms for detection and recognition of signals, developed in the LabVIEW software environment are presented. The architecture and hyperparameters of the neural network allowing quick and efficient training of the network are described. These algorithms and training methods can be applied and adapted for other systems and applications, making them very useful for a wide range of tasks. The system was tested both on simulated signals and in a real communication channel. The results obtained confirm the effectiveness of the proposed methods and emphasise their potential for further application and research.

Keywords: signal spectrum, automatic digital modulation recognition, neural network, additive white Gaussian noise, phase offset, frequency offset.

ISSN 0002-306X. Proc. of the RA NAS and NPUA Ser. of tech. sc. 2024. V. LXXVII, N1

UDC 621.3.049.77

MICROELECTRONICS

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.1-58

V.Sh. MELIKYAN, A.A. GALSTYAN, S.A. GHUKASYAN, A.A. GHAZARYAN, E.E. KARAPETYAN

DEVELOPMENT OF PARAMETERIZED MODEL OF LOGIC ELEMENTS AT CLOCK TREE SYNTHESIS

Clock synthesis, routing optimization, placement and logic optimization are the three primary phases of physical design implementation. Since clock network synthesis uses at least 30% of the entire power budget, it is one of the crucial steps. Power consumption for high-performance blocks can reach 50% of the entire power. Not only would a high-quality clock tree will fix timing violations, but it will also minimize power usage and routing resource use. A new neural network based parameterized model is proposed in this paper, which can be used to obtain not only the list of logic elements, but it also can predict the circuits timing behaviour. Different ICs using SAED 14 and 32 nm technologies are designed using the proposed method.

Keywords: clock tree synthesis, automation, physical design, timing critical, neural network.

Introduction. There are three primary branches of clock distribution: the conventional clock network, the multisource clock network, and the mesh network (Fig.1). The mesh network is deeper in the global clock trunk than the multisource clock network, while the multisource clock network is shallower. This is the difference between the two types of clock networks.





The clock structure will include a global driver and a local sink (Fig.2)[1]. Mesh routing distinguishes between conventional clock networks and mesh networks, often known as multi source clock networks. Higher local sink depth is a benefit of multisource clock dispersion. In comparison to a full mesh network, it trades off routing resources, and consequently power as well. The reduced on-chip variance is a benefit of the mesh network. The drawback of the mesh or multisource clock distribution is that proper clock network delay propagation requires the use of spice simulation to extract the cell, net delay, and output transition time at the mesh routing. This is due to the inaccuracy with which static timing analysis (STA) can determine the mesh driver's cell output delay, mesh net latency, and mesh net output transition.



Fig. 2. Global and Local sinks

The distinction between the mesh clock distribution and the multisource method is that the latter may skip step 7 since step 1 contains additional tap drivers. Traditionally, a custom method has been used to complete the global driver stages 1 through 5 (Fig.3), because the EDA tool is not yet ready to handle the implementation [2-6]. The drawback of a tailored solution may be the requirement for numerous iterations to reach the desired time convergence and latency.

This is because of the nature of the estimated versus expected implementation error gap. For global clock drivers, some designs may have used a bespoke superclock cell [7,8] in order to obtain a greater driving range and reduced power consumption.

In different physical implementation tools, basically two CTS flows are supported, Classic CTS and Concurrent Clock & Data (CCD). During the first flow, first runs CTS then data path optimization. The clock tree is built while ignoring the data paths, the goal is to minimize skew. In the second CCD flow, CTS and data path optimization perform concurrently and it is recommended for timing-critical designs. The clock tree is built with full knowledge of data path timing the goal is to meet setup/hold timing.



Fig. 3. Clock tree optimization steps

Various approaches have been used to optimize power, delay and skew to make clock distribution networks suitable for low-power and high-performance designs. An extensive study of different clock distribution networks, their timing performance is carried out. Different architectures for clock distribution networks are employed to meet various design requirements [9-14].

Thus, having a parameterized model to choose the right cell known as super clock cell from Logic Libraries will shrink selecting time for Physical Implementation EDA tools the clock tree will be balanced and time convergence, latency, power dissipation will be in the desired range. Having a parameterized model also shrinks time-to-time, as iterations in already mentioned clock tree optimization steps will reduce. Choosing super clock cells from Logic Libraries is a difficult task, neural network principles are used during this work. The proposed model can be used for all clock tree strategies during optimization.

Neural networks (Fig.4) are computational models inspired by the human brain, designed to recognize patterns, and make decisions.



Fig. 4. Graphical abstraction of a neural network

Keras, a high-level neural network API [15], simplifies the implementation process by providing an easy interface for building and training models. Algorithms within neural networks, like backpropagation, optimize weights to minimize errors during training, enhancing the model's ability to generalize patterns in data.

Keras API incorporates diverse algorithms for training neural networks. One fundamental algorithm is backpropagation, wherein the model (Fig.5) refines weights based on the gradient of the loss function concerning those weights. This optimization process aims to minimize the disparity between the predicted and actual outputs during the training phase.



Fig. 5. Two models of Keras

Moreover, Keras supports various optimization algorithms, such as Adam and Stochastic Gradient Descent (SGD), influencing the weight updating. These algorithms contribute to the improvement of convergence speed and efficiency during the training process. Additionally, Keras provides activation functions like ReLU, Sigmoid, and Tanh, introduction of non-linearity to the model. This characteristic enables the model to grasp intricate patterns and relationships within the data.

Having an automated flow to generate a cell list for the clock tree synthesis provides several benefits:

• Automation: A flow allows for automation of the process, reducing the change of human error and saving time.

• Scalability: As the design complexity increases, manually maintaining a cell list becomes impractical.

And also, using neural networks for predicting the clock tree synthesis results in the early stages of design with cells offers several benefits:

• Speed and efficiency: Neural network can quickly process large amounts of data and make predictions faster than traditional methods.

• Complex pattern recognition: Neural networks excel at recognizing complex patterns within datasets. In the context of CTS, where the interactions between different cells and components are intricate, neural networks can capture these relationships and provide more accurate predictions.

• Adaptability: Neural networks can adapt to different design scenarios and change in requirements.

• Early design insights: Neural networks can provide early insights into potential CTS challenges and optimizations.

The proposed approach. A new methodology is described aimed to fasten the process and help the tool to fix the selected problem during the CTS stage.

The CTS creating and analyzer program which is implemented using the proposed algorithm is described below.

The CTS creating and analyzer work can be separated into three main parts:

1. Library analyzer – which will select the most optimal cells from std cells library for CTS.

2. Clock tree analyzer -AI - based system, which will predict the results after CTS, which used the selected cells.

3. CTS – The CTS process in physical implementation tool, where we use cells required in the library analyzer stage.

Graphical implementation for the above mentioned (Fig. 6).



Fig. 6. Graphical approach to the proposed algorithm

As mentioned, the first stage is the library analyzer. The Library Analyzer, implemented as a Perl script, examines the .lib file, identifying and systematically reporting on the presence of all symmetric cells. As a result, Library analyzer yields a comprehensive list of symmetric cells as a consequence of its analysis. Notably, the defined threshold for inclusion is set at 30%, signifying those cells surpassing this symmetry criterion for utilization in our Clock Tree Synthesis (CTS) processes. Also, library analyzer filters the cells from one VT because, it is essential to achieve synchronous and reliable operation in integrated circuits. This uniform VT is instrumental in mitigating skew, which refers to timing discrepancies among different segments of the clock tree. By ensuring a consistent VT, clock signals, propagate at comparable speeds throughout the circuit reducing timing variations and enhancing the overall performance and stability of the system. The main steps for library analyzer are: (Fig. 7).



Fig. 7. The library analyzer's workflow

In the second stage, we analyze our design for the CTS side by using the analyzer. The program is python-based where the user should do the steps mentioned below (Fig.8):



Fig. 8. Part of the used database

1. Load and split dataset which has been initially created. The part of the initially created database shown in Table. 1.

2. Normalize the input features.

3. Define the neural network model: The script uses the "Sequential" model from the "keras.models" module. The model consists of three Dense layers with different activation functions. The first layer has 64 units and uses the "relu" activation function. The second layer also has 64 units with "relu" activation. The third and final layer has a single unit with a linear activation function.

4. Compile the model: The model is compiled using the "mean_squared_error" loss function and the "adam" optimizer. This prepares the model for training.

5. Train the model: The model is trained using the "fit()" function, which takes the training sets ("X_train" and "y_train"), the number of training epochs, the batch size, and the "verbose" parameter to control the progress output.

6. Evaluate the model: After training, the model is evaluated on the testing set using the "evaluate()" function. The mean squared error (MSE) between the predicted values and the true values is calculated and printed.

7. Make predictions on new data: Finally, the model is used to make predictions on new input data. A new data point is created (in this example, with arbitrary values), normalized using the same scaler used for training and passed to the model to obtain the predicted slack value. The predicted slack is then printed.

8. In the final stage, the real CTS in physical implementation tool is implemented, with the use of predicted cells.

Table 1

Metal	Gate	Macro	STD cells	Utili	Cells	Slack	Setup	Hold
stack	count	count	utilization	zation		(ps)	(ps)	(ps)
10	152903	5	56.07	0.91	LVT_INV_S_3;	-0.38	-35	-1
					LVT_INV_8;			
					LVT_INV_10			
11	152424	5	55.35	0.91	LVT_INV_S_4;	-0.12	-10	-2
					LVT_INV_6			
9	140880	5	75.77	0.84	LVT_INV_8;	-0.4	-26	-1
					LVT_INV_10			
11	168452	3	68.23	0.75	LVT_INV_3;	-0.1	0	0
					LVT_INV_4;			
					LVT_INV_6;			
					LVT_INV_8			
					MUX2_MM_2			
	Metal stack 10 11 9 11	Metal stack Gate count 10 152903 11 152424 9 140880 11 168452	Metal stack Gate count Macro count 10 152903 5 11 152424 5 9 140880 5 11 168452 3	MetalGate countMacro countSTD cells utilization10152903556.0711152424555.359140880575.7711168452368.23	Metal stack Gate count Macro count STD cells utilization Utili zation 10 152903 5 56.07 0.91 11 152424 5 55.35 0.91 9 140880 5 75.77 0.84 11 168452 3 68.23 0.75	Metal stack Gate count Macro count STD cells utilization Utili zation 10 152903 5 56.07 0.91 LVT_INV_S_3; LVT_INV_8; LVT_INV_10 11 152424 5 55.35 0.91 LVT_INV_S_4; LVT_INV_66 9 140880 5 75.77 0.84 LVT_INV_10 11 168452 3 68.23 0.75 LVT_INV_4; LVT_INV_6; LVT_INV_6; LVT_INV_8 14000 1 168452 3 68.23 0.75 LVT_INV_3; LVT_INV_4; LVT_INV_6; LVT_INV_8 11 168452 3 68.23 0.75 LVT_INV_4; LVT_INV_4; LVT_INV_6; LVT_INV_6;		

Dataset of different technologies

Results. The library analyzer provides an automated solution for cells selecting process. The solution is technology independent and fully automated which means that it gives an opportunity to do the selection automatically instead of doing it manually. For the design parameter prediction, a CTS analyzer has been developed which is a neural network-based workflow. The CTS analyzer gives an opportunity to check the design slack, setup, hold, and dynamic power consumption results in early stages. The CTS analyzer's operational (predicted results raw) and results from design (real results row) outcomes are comprehensively presented in a tabular format (Table 2).

Table 2

Design		Pred	icted re	sults	Real results			
	Slack	Setup	Hold	Dynamic	Slack	Setup	Hold	Dynamic Power
	(ps)	(ps)	(ps)	Power(<i>mWt</i>)	(ps)	(ps)	(ps)	(mWt)
Design1	-15	-7	-2	0.967	-12	-8	0	0.923
Design2	-13	-9	-25	1.125	-11	-11	-26	1.101
Design3	-8	0	-6	0.865	-9	-2	-7	0.894

The predicted versus real results

Conclusion. In this paper, a digital standard cell library parameterized neural network model was developed, from which the most optimal cells mostly fast and symmetrical, are selected for the construction of the clock tree. The proposed model is able to achieve timing and power improvement compared to the default clock tree synthesis. It is suitable for full chip clock planning, as reducing iterations for spice simulation tool to backannotate the driver cell delay. Next, parameters are

pre-determined, the maximum deviation of which is 20% compared to the real one. The application of the model makes it possible to reduce the design time, as it gives a chance to get an idea about the parameters of the circuit in the initial stages of design. Since customization is allowed, it can be part of the non-default permuton exploration in design space optimization (DSO.AI) [16] tool, for future studies.

REFERENCES

- Chong A.B. Hybrid Multisource Clock Tree Synthesis // 2021 28th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS). - Dubai, United Arab Emirates, 2021. – P. 1-6, doi: 10.1109/ICECS53924.2021.9665516.
- ObstacleAvoiding and Slew-Constrained Clock Tree Synthesis with Efficient Buffer Insertion / Y. Cai, C. Deng, C. N. Sze, et al // IEEE Transactions on Very Large-Scale Integration (VLSI) Systems. - Jan. 2015. - Vol. 23, no. 1. - P. 142-155.
- Practical Full Chip Clock Distribution Design with a Flexible Topology and Hybrid Metaheuristic Technique / E.K. Teh, M.A. M. Zawawi, M.F. P. Mohamed, et al // IEEE Access. – 2021. - Vol. 9. - P. 14816-14835, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3053052.
- Rajaram A., and Pan D.Z. Robust chip-level clock tree synthesis for SOC designs // 2008 45th ACM/IEEE Design Automation Conference. - Anaheim, CA, USA, 2008. -P. 720-723, doi: 10.1145/1391469.1391654.
- Fumihiro M., and Midori T. Clock Tree Synthesis Based on RC Delay Balancing // Proceedings of The IEEE Custom Integrated Circuits Conference. - May 1992. -P.28.3.1-28.3.4, doi: 10.1109/CICC.1992.591862
- Dong-Jin L., and Igor L.M. Obstacle-aware Clock-Tree Shaping During Placement // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems.-Feb. 2012. - Vol. 31. - P. 205-216, doi: 10.1109/TCAD.2011.2173490
- Zhu H. and Kursun V. 2-Phase high-frequency clock distribution with SPLIT-IO dual-Vt repeaters for suppressed leakage currents // 2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). - May 2015. - P. 2932-2935, doi: 10.1109/ISCAS.2015.7169301.
- Kumar Gundu A. and Kursun V. Low Leakage Clock Tree with Dual-Threshold-Voltage Split Input–Output Repeaters // IEEE Transactions on Very Large-Scale Integration (VLSI) Systems.- July 2019. - V. 27, no. 7. - P. 1537-1547.
- Vishnu P.V., Priyarenjini A.R., and Kotha N. Clock Tree Synthesis Techniques for Optimal Power and Timing Convergence in SoC Partitions // 2019 4th International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology (RTEICT). - Bangalore, India, 2019. - P. 276-280, doi: 10.1109/RTEICT46194.2019.9016727.
- A Clock Tree Synthesis Scheme Based on Flexible H-tree / H. Wang, Q. Lei, Y. Yang, et al // 2022 2nd International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT). - Hangzhou, China, 2022. - P. 249-252, doi: 10.1109/ICEEMT56362.2022.9862608.

- Clock Tree Resynthesis for Multi-Corner Multi-Mode Timing Closure / S. Roy, P.M. Mattheakis, L. Masse-Navette, et al // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. - April 2015. - V. 34, no. 4. - P. 589-602, doi: 10.1109/TCAD.2015.2394310.
- Top-level activity-driven clock tree synthesis with clock skew variation considered / T.J. Wang, S.H. Huang, W.K. Cheng, et al // 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). - Montreal, QC, Canada, 2016. – P. 2591-2594, doi: 10.1109/ISCAS.2016.7539123.
- Melikyan V., Martirosyan M., Melikyan A., Piliposyan G. 14nm Educational Design Kit: Capabilities, Deployment and Future // Small Systems Simulation Symposium. - Niš, Serbia, 12th-14th February 2018. - P. 37-41.
- 32/28nm Educational Design Kit: Capabilities, deployment and future / Goldman, R. Bartleson, K. Wood, T. Kranen, et al // Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics and Electronics (PrimeAsia), IEEE. - 2013. - P. 284-288, doi: 10.1109/PrimeAsia.2013.6731222.
- 15. Gulli A and Pal S., Deep learning with Keras.- Packt Publishing Ltd; 2017.
- 16. Design Space Optimization AI, https://www.synopsys.com/implementation-and-signoff/ml-aidesign/dso-ai.html

National Polytechnical University of Armenia. The material is received on 01.04.2024.

Վ.Շ. ՄԵԼԻՔՅԱՆ, Ա.Ա. ԳԱԼՍՏՅԱՆ, Ս.Ա. ՂՈԻԿԱՍՅԱՆ, Ա.Ա. ՂԱԶԱՐՅԱՆ, Է.Ե. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

ՍԻՆՔՐՈԱՉԴԱՆՇԱՆԱՅԻՆ ԾԱՌԻ ՍԻՆԹԵՉԻ ԴԵՊՔՈՒՄ ՏՐԱՄԱԲԱՆԱԿԱՆ ՏԱՐՐԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԱՑՎԱԾ ՄՈԴԵԼԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Սինքրոազդանշանային ծառի, միջմիացումների և տեղաբաշխման լավարկումը ֆիզիկական նախագծման երեք հիմնական փուլերն են։ Քանի որ սինքրոազդանշանային ծառն օգտագործում է ամբողջ էներգիայի առնվազն 30%-ը, հետևաբար՝ այն ֆիզիկական կարևոր փուլերից մեկն է։ Բարձր արդյունավետությամբ ինտեգրալ սխեմաների համար էներգիայի սպառումը կարող է հասնել ամբողջ էներգիայի 50%-ին։ Լավարկված սինքրոազդանշանային ծառը ոչ միայն կուղղի ժամանակի խախտումները, այլն կնվազեցնի և՛ էներգիայի, և՛ միջմիացումների ռեսուրսի օգտագործումը։ Առաջարկվում է նեյրոնային ցանցի վրա հիմնված նոր պարամետրացված մոդել, որը կարող է օգտագործվել ոչ միայն տրամաբանական տարրերի ցանկը ստանալու համար, այլն կանխատեսում է սիեմաների ժամանակային պարամետրերը սինքրոազդանշանային ծառի նախագծման ընթացքում։ Պարամետրերը գնահատելու համար առաջարկված մեթոդով նախագծվել են տարատեսակ ինտեգրալ սիեմաներ՝ ՍԱՈՒԴ 14 և 32 նմ տեխնոլոգիաներով։

Առանցքային բառեր. սինքրոազդանշանային ծառի սինթեզ, ավտոմատացում, ֆիզիկական նախագծում, կրիտիկական ժամանակ, նեյրոնային ցանց։

В.Ш. МЕЛИКЯН, А.А. ГАЛСТЯН, С.А. ГУКАСЯН, А.А. КАЗАРЯН, Э.Е. КАРАПЕТЯН

РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СИНТЕЗЕ ДЕРЕВА СИНХРОСИГНАЛА

Оптимизация синхросигналов, межсоединений и размещения — три основных этапа физического проектирования. Поскольку дерево синхронизации потребляет не менее 30% общей энергии, следовательно, это один из важных этапов. Для высокоэффективных блоков потребление энергии может достигать 50% от общего объема энергии. Оптимизированное дерево синхронизации не только исправит нарушения синхронизации, но также снизит энергопотребление и использование ресурсов межсетевого соединения. В данной статье предлагается новая параметризованная модель на основе нейронной сети, которую можно использовать не только для получения списка логических элементов, но и для прогнозирования временных параметров схем при построении дерева синхросигналов. С использованием предложенного метода оценки параметров были спроектированы различные интегральные схемы с технологиями САУД 14 и 32 *нм*.

Ключевые слова: синтез дерева синхросигнала, автоматизация, физическое проектирование, критическое время, нейронная сеть.

ISSN 0002-306X. Proc. of the RA NAS and NPUA Ser. of tech. sc. 2024. V. LXXVII, N1

UDC 004.33

MICROELECTRONICS

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.1-69

A.V. BABAYAN, S.K. SHOUKOURIAN

LEARNING METHODOLOGY FOR VALIDATION OF MEMORY BIST SOLUTIONS VIA A SHARED INTERFACE

Memory built-in self-test (MBIST) continues to have its unique place in IC industry. It provides test and repair capabilities which significantly increase IC manufacturing yield.

In general, the integration of MBIST solutions in a system on chip (SoC) is done via automated flows. Possible issues occurring in the flow should not be skipped as it will degrade the performance of SoC or even may disrupt its functioning. The probability of issues is increased if the SoC has specific structure adding limitations for MBIST solution such as testing the memories by shared interface. Dedicated validation environments (VE) help to overcome these issues.

Validation challenges of the MBIST solution via a shared interface for a specific case of multi memory bus BIST engines (MMBBE) are discussed, and a solution is proposed. To avoid the exhaustion increase for the integration scenarios random choices combined with some exhaustions are done depending on a given feature's priority. Meantime, it is mentioned that for big configurations the usage of random values of parameters might bring to missing some corner cases. Due to that it is recommended to use further some learning methods for reducing the VE iterations and exhaustion within a given iteration. In all the cases, a targeted analysis should be done and decisions should be additionally taken to find out a reasonable number of these iterations.

In this paper, a methodology is proposed to soften the mentioned above exhaustion. A new algorithm of learning is proposed, and the results of the algorithm application are adduced which justify its efficiency in reducing the exhaustion.

Keywords: MBIST, test and repair validation, shared interface test, test integration, SoC test, randomization.

Introduction. The continuous increase in the requirements set to IC performance creates new challenges for its maintenance for various criteria, in particular, reliability. Test and repair solutions [1,2] which increase IC reliability, typically do not meet IC vendors' specifications. Particularly, the latter do not accept any modification in the system which brings additional limitations when inserting a testing infrastructure. In such systems, the testing units are connected to the shared interface which allows to have access to them, and the test can be applied through those connections [3]. Considering these, the multi-memory bus BIST engine (MMBBE) solutions are proposed [4,5] for shared interfaces.

1. MMBBE structure. To test multiple memory groups, MMBBE uses an already implemented shared interface (Fig. 1). It consists of common signals which are necessary to test memories. The type and number of memories and interfaces may vary depending on SoC specification. Having the description of memories and interfaces, the proper MMBBE is created.



Fig. 1. SoC with memories

Each memory group may have different addressing, read/write and sharing mechanisms. A memory in a group may have its own banks, several ports, and other features (Fig. 2). As per [6] MMBBE is connected to the group via a bus which supports pipeline stages, memory latencies, shared connections within a group, etc.



Fig. 2. MMBBE to memory group connections

The integration of the MMBBEs with the described features may have some mismatches which can cause unacceptable consequences. One covers the system's description from test perspective including testing units, i.e., memories. Insufficient or inappropriate description can lead to wrong implementation of the MMBBE.

To assure that the test solution through the shared interface is properly implemented, a validation methodology was suggested in [4]. The methodology tried to solve two problems:

1. find the parameters which describe the system's important features and perform exhaustive variations on those values with an expectation to provide a reasonable coverage;

2. avoid huge variations by selecting random values for the rest of the parameters.

The methodology has defined the primary parameters which indicate the existence of some features in the system. For these features, a validation environment (VE) has been created which allows to create the described above scenarios with configurable value ranges.

It is mentioned that for big configurations to avoid exhaustion increase, random values of parameters are used, which might bring to missing some corner cases. In particular, the MMBBE VE enables iterations both for primary and nonprimary parameters. The variations on parameters whose values are chosen randomly, can be performed multiple times. To estimate these variations, it is proposed to use learning for outlining the scope of varied parameters for localization of failures and for bypass from repeating iterations. That will reduce the VE iterations, and an exhaustion within a given iteration according to some criteria.

In the next section, the mentioned approach and a learning algorithm for VE usage are described in detail.

2. The proposed solution. Basically, MMBBE VE iterates through the primary binary parameter (PBP) values and, for each such specific scenario of values named further **PBP vector**, randomly selects acceptable values of the non-primary parameters.

To represent the VE functionality in more detail, the following variables are defined:

n – the number of PBPs;

i-iteration index for VE actions;

For each iteration i the following variables are defined:

N_i – the number of random variations for a PBP vector;

F_i- the number of the observed failures;

k_i - the number of essential PBPs with fixed values;

P_i – the percentage of the observed failures.

After defining othe above variables, the following actions are sequentially executed using the VE:

1. Assigning the initial value: i=0.

2. Assessing the value and assigning the value to N_i.

3. Generating $N_i {\cdot} 2^{n {\cdot} k}$ testcases for simulations using MMBBE VE (k=k_i, k_0=0).

4. Performing simulations and determining the F_i set.

5. Calculating $P_i = F_i/(N_i \cdot 2^{n-k}) \cdot 100\%$ (k=k_i).

6. Performing essential ordering of parameters and their values via analysis of PBP vectors that bring to failures during simulations:

• the parameter which occurs with the same value most often in the considered PBP vectors is named the most essential;

• in the case when the occurrence is similar for more than one parameter or for two different values of the same parameter, the determination of their ordering is carried out using other criteria (e.g., via secondary parameter analysis, less timeconsuming during runs, etc.).

7. Increment i.

8. Assessing the k_i value as follows; the fixed scenario composed of k_i bits of a PBP vector should yield more than half of the failures from F_i and $P_i > P_{i-1}$. If there are several similar combinations, the greatest is chosen. If all scenario failures have close values, the exhaustion of all values in iterations is inevitable.

9. Inverting the PBPs which are chosen at iteration i-1, and fixing for the rest of the iterations.

10. Repeating steps 2-9 until the $k_i=n$.

3. Experimental results. The application of the proposed method is applied to the SMS MMB processor compiler of Synopsys using MMBBE VE. The 8 PBPs are described below.

1. *Multi interface design*. Specifies whether the testcase contains a single or multiple MBIST interfaces.

2. *Multi memory design*. Specifies whether the testcase contains an interface which is connected to the multiple memory instances or not.

3. *Repairable design*. Specifies the ability to repair at least one memory instance.

4. *Design with latencies*. Specifies whether there is a memory instance with operation latency or not.

5. *Design with memory masks*. If specified, there is at least one memory instance which has a data masking port.

6. *Design with partially connections*. If specified, there is at least one memory instance whose address/data bits are not fully accessible through MBIST interface.
7. *Design with multi-port memory*. Specifies whether there is a memory with multiple read/write ports or not.

8. *Design with multi-bank memory*. If specified, there is at least one multi-bank memory instance.

For the first iteration, N_0 was chosen 50 and $50*2^8$ testcases were generated. Running these testcases it became clear that $F_0=241$ ($P_0=1.88\%$). Since the generated cases are numbered, the priority list of failures can be composed observing these numbers. Considering MMBBE structure, 6 PBPs were fixed to the values which were most common in failing testcases. The features corresponding to the first two fixed values were 8^{th} and 5^{th} PBPs as enabled. The rest of the fixed PBPs had more even distribution, and the adjustment of those was necessary to be carried out. To highlight the impact of these four fixed values, the previous two PBPs were inverted. The second iteration was done with $N_1=3200$ to keep the same number of testcases. As expected, the number of failures increased due to localization becoming $F_1=541$ ($P_1=4.22\%$). For the second iteration, 4^{th} , and 6^{th} PBPs with enabled values were common which could be inverted for the third iteration. The details for all iterations are described in Table.

Table

Iteration (i)	Fixed bits (k _i)	Testcases (N _i *2 ^(n-ki))	Failed cases (Fi/Pi)
1	0	50*256	241/1.88%
2	6	3200*4	541/4.22%
3	6	1600*4	201/3.14%
4	6	800*4	427/13.34%

Validation Environment Iterations

For the last two iterations, the number of fixed bits (k_3 and k_4) are the same, because the combinations give approximately similar failure percentages. After 4th iteration, corner cases remained which will be manually analyzed.

In fact, each next iteration takes less time and requires less effort to analyze failures. The proposed method can be used for different number of parameters, and for each iteration, the reducing scheme may vary depending on system structure and its representation form.

Conclusion. A validation methodology is proposed for memory test and repair solutions working with shared interfaces. The steps of the proposed approach estimate and reduce the number of execution iterations of a validation environment as follows:

1. dependencies between some elements of the PBP are determined and exhaustion is performed based on the consideration of these dependencies;

2. after an estimation of an impact for a given dependence, the specific values of the PBP corresponding elements which highlighted the consideration of the dependence are inverted, and a search for new dependencies is initiated;

3. due to the application of the approach, the number of considered random test-cases is reduced by 30% on average;

4. the performed experiments have confirmed the efficiency of the proposed approach.

REFERENCES

- Zorian Y., Shoukourian S. Test solutions for nanoscale Systems-on-Chip: Algorithms, methods and test infrastructure // IEEE Ninth International Conference on Computer Science and Information Technologies Revised Selected Papers. – September, 2013. – P. 1-3.
- Harutyunyan G., Shoukourian S., Zorian Y. Fault Awareness for Memory BIST Architecture Shaped by Multidimensional Prediction Mechanism // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – March, 2019. – Vol. 38, no. 3. – P. 562-575.
- 3. McLaurin T., Knoth R. The Challenges of Implementing an MBIST Interface: A Practical Application // IEEE International Test Conference (ITC). 2019. P. 1-6.
- 4. https://news.synopsys.com/2014-10-21-Synopsys-STAR-Memory-System-Multi-Memory-Bus-Processor-Enables-10-Percent-Die-Size-Reduction-for-Marvell-SoC
- 5. https://resources.sw.siemens.com/en-US/video-automating-physical-mapping-on-armip-with-tessent
- Babayan A. Validation and Test Challenges for Multi-Memory Bus BIST Engines // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – September, 2023. – P. 1-6.

National Polytechnical University of Armenia. The material is received on 10.03.2024.

Ա.Վ. ԲԱԲԱՅԱՆ, Ս.Կ. ՇՈՒՔՈՒՐՅԱՆ

ՈՒՍՈՒՑԱՆՎՈՂ ՄԵԹՈԴԱԲԱՆՈՒԹՅՈՒՆ ՀԻՇՈՂ ՍԱՐՔԵՐԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԿԱՊՈՒՂՈՎ ՆԵՐԿԱՌՈՒՑՎԱԾ ԻՆՔՆԱԹԵՍՏԱՎՈՐՄԱՆ ԼՈՒԾՈՒՄՆԵՐԻ ՎԱՎԵՐԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱՐ

Հիշող սարքերի ներկառուցված թեստավորումը (MBIST) շարունակում է զբաղեցնել իր ուրույն տեղը ինտեգրալ սխեմաների (ԻՄ) արդյունաբերությունում։ Այն ընձեռում է թեստավորման և վերականգնման հնարավորություններ, որոնք զգալիորեն բարձրացնում են ԻՄ արդյունաբերության պիտանի ելքի տոկոսը։

Ընդհանուր առմամբ, բյուրեղում (SoC) MBIST լուծումների ինտեգրումը կատարվում է ավտոմատացված հոսքուղիների միջոցով։ Հոսքուղում առաջացող հնարավոր խնդիրները չպետք է բաց թողնվեն, քանի որ դրանք կվատթարացնեն կամ, նույնիսկ, կխափանեն բյուրեղի աշխատանքը։ Խնդիրների հավանականությունը մեծանում է, եթե բյուրեղն ունի հատուկ կառուցվածք, որը սահմանափակումներ է ավելացնում MBIST լուծման համար, օրինակ՝ հիշող սարքերի թեստավորումն ընդհանուր կապուղու միջոցով։ Համապատասխան վավերացման միջավայրերն (VE) օգնում են՝ հաղթահարելու այս խնդիրները։

Քննարկվել են MBIST լուծման վավերացման մարտահրավերներն ընդհանուր կապուղով թեստավորման համակարգերի դեպքում, և առաջարկվել է լուծում։ Ինտեգրման սցենարների հատարկումների աձից խուսափելու համար հատկանիշների հատարկումները զուգորդվում են պատահական ընտրությունների հետ՝ կախված տվյալ հատկանիշի առաջնահերթությունից։ Միևնույն ժամանակ նշվում է, որ մեծ կոնֆիգուրացիաների դեպքում պարամետրերի արժեքների պատահական ընտրության պարագայում կարող է բաց թողնվել որոշ անկյունային դեպքերի դիտարկումը։ Այդ իսկ պատձառով առաջարկվել է օգտագործել որոշակի ուսուցանվող մեթոդներ՝ վավերացման միջավայրի սցենարների հատարկումը նվազեցնելու համար։ Բոլոր դեպքերում, անհրաժեշտ են նպատակաուղղված վերլուծություն և որոշումներ՝ հատարկումների ողջամիտ թիվը որոշելու համար։

Առաջարկվում է մեթոդաբանություն, որը մեղմում է վերը նկարագրված հատարկումը։ Առաջարկվում է ուսուցանվող նոր ալգորիթմ, իսկ ալգորիթմի կիրառման արդյունքները ներկայացվում են, որոնք հավաստում են դրա արդյունավետությունը հատարկման նվագեցման գործում։

Առանցքային բառեր. MBIST, թեստավորման և վերականգնման վավերացում, ընդհանուր կապուղով թեստավորում, թեստավորման ինտեգրում, բյուրեղի վրա թեստավորում, պատահականացում։

А.В. БАБАЯН, С.К. ШУКУРЯН

ОБУЧАЕМАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ВАЛИДАЦИИ РЕШЕНИЙ ПО ВСТРОЕННОМУ САМОТЕСТИРОВАНИЮ УСТРОЙСТВ ПАМЯТИ ЧЕРЕЗ РАЗДЕЛЯЕМЫЙ ИНТЕРФЕЙС

Встроенные системы самотестирования памяти (MBIST) продолжают занимать уникальное место в индустрии интегральных схем (ИС). Они предоставляют возможности тестирования и восстановления ИС, что значительно увеличивает выход годных ИС во время их производства.

Как правило, интеграция MBIST в систему на кристалле (SoC) осуществляется посредством организации автоматизированного потока для процесса интеграции. Не следует игнорировать возможными проблемами при прохождении через поток, поскольку они могут ухудшить производительность SoC или даже нарушить функционирование SoC. Вероятность появления таких проблем увеличивается, если структура SoC накладывает дополнительные ограничения на MBIST, например, такие, как тестирование памяти через разделяемый интерфейс. Нужны специально построенные среды валидации (VE) для преодоления отмеченных проблем.

Обсуждены проблемы валидации MBIST через разделяемый интерфейс в конкретном случае использования процессора MBIST (MMBBE) для нескольких устройств памяти, связанных через разделяемую шину, и предложено соответствующее решение – среда валидации. Во избежание увеличения перебора для сценариев интеграции выполнялись случайные выборки в зависимости от приоритета данной функции в сочетании с определённым перебором. При этом упоминалось, что для больших конфигураций использование случайных значений параметров может привести к пропуску определённых граничных случаев. В связи с этим было предложено в дальнейшем использовать обучающую среду валидации для уменьшения итераций VE и перебора в пределах данной итерации. Во всех случаях необходимо провести целенаправленный анализ и принять решения для нахождения разумного количества таких итераций.

В данной статье предлагается методология смягчения упомянутого выше перебора. Предложен новый обучающийся алгоритм и приведены результаты его применения, обосновывающие его эффективность для снижения перебора.

Ключевые слова: MBIST, валидация тестирования и восстановления, тестирование с общим интерфейсом, интеграция тестирования, тестирование системы на кристалле, рандомизация.

ISSN 0002-306X. Proc. of the RA NAS and NPUA Ser. of tech. sc. 2024. V. LXXVII, N1

UDC 620.3.628.38

MICROELECTRONICS

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.1-77

A.T. SIMONYAN, O.H. PETROSYAN, S.T. MURADYAN APPLICATION OF TEMPERATURE DEPENDANCES OF PARAMETERS IN A SINGLE-DIODE FIVE-PARAMETER MODEL OF SOLAR PANELS

Current economic developments promote the application of solar panels. This results in more companies producing solar panels with quite different specifications. On the other hand, the specifications provided by the manufacturers generally do not contain the full information to be able to calculate the output of the solar panels in different usage conditions. For this reason, we are in the process of building a solar panel model that allows to calculate the output of the solar panels in different usage conditions based on the general data provided in datasheets of commercially available panels.

Previously we provided the methodology of building a solar panel model from the data provided in datasheets of solar panels. In this article, we refine the proposed methodology and apply it on a solar panel BP4180T produced by BP Solar. The output of the refined model is compared with the results of the previous model and with the datasheet data of the solar panel of interest.

The analysis of the obtained results shows the applicability and repeatability of the proposed model.

Keywords: solar panel modelling, PV cell, testing system, solar energy, physical losses in solar panels.

Introduction. A solar panel can be modelled as a single-diode circuit in parallel with a current source, where the diode is the result of the semiconductor material of the solar cell [1-3]. For achieving results closer to real data, more complicated models have been developed for solar panels. Among them, the most used model for characterizing the solar panel performance is the so-called physical loss mechanism, also known as the single-diode five-parameter model (Fig. 1).



Fig. 1. The physical loss model of a solar panel with one diode and two resistors

This model uses one diode and two resistors to describe the electrical losses inside the solar panels. The series resistance represents the energy dissipated in the form of heat in the electric circuit and the shunt resistance represents the current that takes a shortcut to the end instead of going through the desired path. To describe other existing defects in the solar panel such as non-uniform dipping, a diode is included in the model.

Based on solar panel's one diode two resistors physical loss model, the general current-voltage characteristics of a PV panel can be written as:

$$i = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{\nu + R_s}{n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{\nu + i R_s}{R_{sh}} [4].$$
(1)

The following characteristics are usually presented in datasheets of commercial Solar panels: $V_{OC(STC)}$ (open circuit voltage), $I_{SC(STC)}$ (short circuit current), $P_{MAX(STC)}$ (maximum power), Temperature coefficient of I_{SC} , Temperature coefficient of V_{OC} and I-V (current-voltage) characteristic curves for different temperatures.

However, this information is not sufficient to estimate the expected power output of the Solar panel for the given illumination and temperature conditions. One needs to have the model of the Solar panel to be able to perform these calculations.

Model Discussion. In article [4], there is a mechanism on how to obtain solar PV model's parameters values through datasheet data. For this purpose, the article provides a Flowchart. Based on these principles, instead of long mathematical calculations, we have built a computerized model in a MULTISIM environment [5]. The new model generates outcomes identical to ones presented in [4]. We compared the data generated by the model with the results of measurements of the parameters of the solar panel presented in the datasheet (Fig. 2). We demonstrated that although the simulation and measurement results are in general agreement, there is a significant deviation between simulation and measurement results. Hence, the output of this model does not repeat the data presented in the datasheet of solar PV [5], which means that this model has some accuracy limitations.



Fig. 2. Comparisons of the output of previous models [1][4] with measurement results:
a- simulation results (cross markers) compared to the results in [4] (solid lines),
b- simulation results (cross markers) compared to the measurement results from datasheet (solid lines)[1]

To find the limitations of the model and improve it, some research has been carried out. The thorough inspection of the model showed that in equations [2-5] the temperature dependencies of I_{sc} , V_{oc} , I_o were taken into account, but temperature dependences of resistors R_s , R_{sh} weren't taken into account [5]:

$$V_{oc}(T) = V_{oc} + k_{v}(T - T_{STC}),$$
 (2)

$$I_{sc}(T) = I_{sc} \left(1 + \frac{k_i}{100} (T - T_{STC}) \right), \tag{3}$$

$$I_0(T) = \left(I_{sc}(T) - \frac{V_{oc}(T) - I_{sc}(T)R_s}{R_{sh}} \right) e^{-\frac{V_{oc}(T)}{n_s V_t}},$$
(4)

$$I_{ph}(T) = I_0(T)e^{\frac{V_{oc}(T)}{n_s V_t}} + \frac{V_{oc}(T)}{R_{sh}}.$$
 (5)

In fact, for every material the electrical resistance has some dependence on temperature, therefore we are suggesting that this model's resistors should also be encountered as being dependent on temperature [6]. With this assumption, we took a linear dependence on temperature for the resistances in model (6):

$$R(T) = R_{STC} (1 + \alpha (T - T_{STC})).$$
(6)

With the presented equation (6), a new model for BP-MSX120 solar panel has been built [6]. To obtain I-V characteristics of the solar panels at different temperatures we have changed the values of serial and shunt resistances according to (6). To define the temperature coefficient α , we went through the cycles of the algorithm/flowchart from [4] (Fig. 3) to find R_s and R_{sh} resistances of PV panel for each temperature point. In [4], the authors went through that cycle once, for only one temperature they have found one value for R_s and one for R_{sh} , then they used those values for each temperature point [4]. In contrast, we went through the steps of the cycle for each temperature [6].



Fig. 3. A flowchart for determination of the PV panel model parameters [4]

With these steps we have obtained an average value of temperature coefficient α =-0,002. This value of temperature coefficient is in the range of TCR (temperature coefficient of resistance) of silicon [7-9]:

$$TCR = \frac{R_2 - R_1}{R_1 (T_2 - T_1)},\tag{7}$$

which is equal to 0.007 for pure silicon but may vary between $(\pm 0.001 - 0.008)$ °C⁻¹ for semiconductors with different doping concentrations [10, 11]. For

undoped polysilicon films the TCR is about -0.025 °C⁻¹ [12]. As a result, we obtained the data shown in Fig. 4.



Fig. 4. Comparisons of the "new" model [1] and the "old" model [4] with actual results for BP-MSX120 solar panel [5]: a- simulation results (solid lines) considering temperature dependence of serial and shunt resistances ("new" model) compared to the datasheet values (dashed lines) of BP-MSX120 solar panels, b- simulation results (solid lines) considering temperature independence of serial and shunt resistances ("old" model) compared to the datasheet values (dashed lines) of BP-MSX120 solar panel

In Fig. 4a, the datasheet data (dashed lines) compared with our modeling results (solid lines), which includes temperature dependences of serial and shunt resistances of the model.

In Fig. 4b, the datasheet data (dashed lines) compared with the result of the simulation (solid lines) where the temperature dependences of serial and shunt resistances of the model are not taken into account.

The comparison of Fig. 4a and b clearly demonstrates that the model now is significantly improved.

To evaluate the model improvement, we have calculated the root mean square deviation (RMSD) of modeling results from datasheet values for "old" and "new" models (Table 1).

Table 1

The calculated RMSD values of I-V curves obtained by measurement and simulation (BP-MSX120)

T, ℃	Root Mean Square Deviation		
	datasheet data VS existing model	datasheet data VS introduced model	
0° <i>C</i>	0.094	0.079	
25 ⁰ C	0.046	0.034	
50 ⁰ C	0.087	0.087	
75 ⁰ C	0.072	0.072	

Table 1 indicates that the introduction of new temperature dependences improves the model accuracy and brings the output of the model closer to the measurement results.

The comparison of the maximum power points (MPP) resulting from measurements, from "new" model and from "old" model is presented in Table 2.

Table 2

T °C	Po	wer at Maximum Power Poin	it, W
1, C	datasheet	introduced model	existing model
0° <i>C</i>	125.4914	129.1214	134.0488
25° <i>C</i>	113.9456	115.1346	120.0760
50° <i>C</i>	103.3572	103.1626	105.5378
75° <i>C</i>	89.8748	89.9456	91.2999

The output power at MPP of BP-MSX120 solar panels

We calculated the MPP of solar PV because it is one of the most important parameters of Solar PV panels. It is as important as Isc and Voc. That means, if MPP of the curves does not match with the datasheet, the results that we obtained are not correct, even when the values of Isc and Voc match with the values of those given by the datasheet BP-MSX120 solar panel.

Simulation and Results. To prove the consistency of the newly proposed model, we decided to apply this model to another commercially available Solar panel – BP Solar BP4180T.

Using the formulas of article [1], and the parameter detection algorithm given in the same article, we have found Rs and Rsh. Then, by the method we have proposed, the temperature dependances of series and shunt resistances obtained.

Then, we carried out the "new" and "old" model simulations for different temperatures and plotted the corresponding IV curves on Fig. 5 and 6.



Fig. 5. Simulation results (solid lines) considering the temperature dependence of serial and shunt resistances ("new" model) compared to the datasheet values (dashed lines) of BP4180T solar panels



Fig. 6. Simulation results (solid lines) considering the temperature independence of serial and shunt resistances ("old" model) compared to the datasheet values (dashed lines) of BP4180T solar panels

The comparison of Fig. 5 and Fig. 6 clearly demonstrates that the model is improved when the temperature dependances of series and shunt resistances are encountered. This means that the proposed model works for BP4180T solar panel as well.

To show more accurately the data improvement, we calculated the root mean square deviation (RMSD) for BP4180 solar panel at different temperature conditions (0, 25, 50, 75). First, we compared the deviations between the "new" model simulation results and the datasheet data, then we compared the deviations between the "old" model simulation results and the datasheet data (Table 3).

Table 3

The calculated RMSD values of I-V curves obtained by measurement and simulation (BP4180T)

т ⁰ С	Root Mean Sq	uare Deviation
Ι, ΰ	datasheet data VS existing model	datasheet data VS introduced model
0° <i>C</i>	0.07902	0.07759
25° <i>C</i>	0.08640	0.08640
50° <i>C</i>	0.08755	0.08752
75° <i>C</i>	0.09877	0.09867

Then we calculated the maximum power points for all IV curves and compared the results with datasheet values (Table 4). As can be seen, the output of the "new" model is closer to the datasheet data than the output generated from the "old" model.

Table 4

T, ℃	Pow	ver at Maximum Power Poi	nt, W
	datasheet	introduced model	existing model
0° <i>C</i>	200.3549	199.8877	199.4987
25° <i>C</i>	182.8636	179.2859	179.2859
50° <i>C</i>	166.9706	161.8130	158.8646
75° <i>C</i>	145.0250	144.0908	138.3472

The output power at MPP of BP4180T solar panels

Conclusion. In this work, we applied the proposed by us new model to another solar panel. Following the same algorithm as in previous works, performing calculations and modeling, we got the model output for BP4180 solar panels for different temperatures. We compared the IV curves obtained by the new model with the curves of the datasheet, then we compared the curves of the old model with the curves of the datasheet. As a result, a clear improvement of the model is noticeable when we introduce the temperature dependence of serial and shunt resistances of the solar panel model.

Thus, it is shown that the new model proposed for the simulation of solar panels generates results much closer to the measurements than the old model does.

REFERENCES

- Simonyan A.T. New modeling approach to single-diode model of solar panels using multisim software // Proceedings of National Polytechnic University of Armenia: Information technologies, electronics, radio engineering. -2023. - N1.- P. 78-86, doi:10.53297/18293336.
- Kadeval H.N., Patel V.K. Mathematical modelling for solar cell, panel and array for photovoltaic system // Journal of Applied and Natural Science.-2021.-13(3).-P.937-943, doi: <u>https://doi.org/10.31018/jans.v13i3.2529</u>.
- Nadia M., Lassad H., Abderrahmen Z., Abdelkader C. Influence of temperature and irradiance on the different solar panel panel technologies// International Journal of Energy Sector Management.- 2021.- Vol. 15, No. 2. - P. 421-430, Doi: https://doi.org/ 10.1108/IJESM-06-2020-0002.
- Sera D., Teodorescu R., Rodriguez P. PV panel model based on datasheet values// Aalborg University, Institute of Energy Technology, DK-9220.- Aalborg, Denmark, IEEE, 1-4244-0755-9/07.- 2007.- P. 2392-2396.
- Petrosyan O.H., Muradyan S.T., Simonyan A.T. Introduction of New Temperature Dependances of Parameters in a Single-Diode Five-Parameter Model of Solar Panels// 2023 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS).- Batumi, Georgia, 2023.-P. 1-4, doi: 10.1109/EWDTS59469.2023.10297091.

- Simonyan A.T. Design of a system for measuring the maximum power point of solar panels // Bulletin of National Polytechnic University of Armenia.- 2022. - P.177-182.-UDC 621.316.58
- Chigak A.S., Sheryazov S.K. Study of the energy characteristics of solar cells // South Ural State Agrarian University.- Chelyabinsk, Russia, 2020. –P.406-411.
- Belsky A.A., Glukhanich D.Y., Carrizos M.J. Analysis of specifications of solar photovoltaic panels // Renewable and Sustainable Energy Reviews.- 2022.-Vol.15, 112239, ISSN 1364-0321.
- Singh P., Ravindra N.M. Temperature dependence of solar cell performance—an analysis // Solar Energy Materials & Solar Cells, Department of Physics.- New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ 07901, USA, Elsevier B.V., 2012.- P.36-45, doi:10.1016/j.solmat.2012.02.019
- Norton P, Brandt J. Temperature coefficient of resistance for p- and n-type silicon // Solid-State Electronics.- 1978.-Vol.21, issue 7, ISSN 0038-1101.- P. 969-974, doi.org/ 10.1016/0038-1101(78)90296-4
- Bullis W.M., Brewer F.H., Kolstad C.D., Swartzendruber L.J. Temperature coefficient of resistivity of silicon and germanium near room temperature // Solid-State Electronics.-1968.-Vol. 11, issue 7, ISSN 0038-1101, P.639-646., doi.org/10.1016/ 0038-1101(68)90065-8.
- Kovalevskii A.A., Dolbik A.V., Voitekh S.N. Effect of doping on the temperature coefficient of resistance of polysilicon films // Russ Microelectron 36.- 2007.- P.153– 158, doi.org/10.1134/S1063739707030031.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 10.04.2024.

Ա.Տ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Օ.Հ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Ս.Տ. ՄՈՒՐԱԴՅԱՆ

ԱՐԵՎԱՅԻՆ ՎԱՀԱՆԱԿԻ ՄԵԿ- ԴԻՈԴ ՀԻՆԳ -ՊԱՐԱՄԵՏՐ ՄՈԴԵԼԻ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅՈՒՆԸ՝ ՀԱՇՎԻ ԱՌՆԵԼՈՎ ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԿԱԽՎԱԾՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ներկայիս տնտեսական զարգացումները նպաստում են արևային վահանակների կիրառմանը։ Սա հանգեցնում է նրան, որ ավելի շատ ընկերություններ արտադրում են արևային վահանակներ՝ միանգամայն տարբեր բնութագրերով։ Սակայն արտադրողների կողմից տրամադրված բնութագրերը հիմնականում չեն պարունակում ամբողջական տեղեկատվություն, որպեսզի հնարավոր լինի հաշվարկել արևային վահանակների ելքը օգտագործման տարբեր պայմաններում։ Ուստի այժմ արևային վահանակների մոդելի կառուցման փուլում ենք, երբ հաշվարկվում է արևային վահանակների ելքը տարբեր պայմաններում՝ հիմնվելով վահանակների տեխնիկական փաստաթղթերում ներկայացված ընդհանուր տվյալների վրա։

Նախկին աշխատանքներում ներկայացրել ենք արևային վահանակների մոդելի կառուցման մեթոդաբանությունը՝ արևային վահանակների տեխնիկական փաստաթղթում ներկայացված տվյալների հիման վրա։ Այս հոդվածում ցույց են տրվում առաջարկվող մեթոդի կրկնելիությունը և կիրառումը այն BP4180T արևային վահանակի վրա, որ արտադրում է BP Solar -ը։ Կատարելագործված այս մոդելի արդյունքները համեմատվել են նախորդ մոդելի արդյունքների և արևային վահանակի տեխնիկական փաստաթղթում ներկայացված տվյալների հետ։

Ստացված արդյունքների վերլուծությունը ցույց է տալիս առաջարկվող մոդելի կիրառելիությունը և վերարտադրելիությունը։

Առանցքային բառեր. արևային վահանակի մոդել, ֆոտովոլտային վահանակ, թեստավորման համակարգ, արևային էներգիա, ֆիզիկական կորուստներ արևային մարտկոցներում։

А.Т. СИМОНЯН, О.А. ПЕТРОСЯН, С.Т. МУРАДЯН

ПРИМЕНЕНИЕ ОДНОДИОДНОЙ ПЯТИПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Текущее экономическое развитие благоприятствует использованию солнечных батарей. Это приводит к тому, что все больше компаний производят солнечные панели с совершенно разными характеристиками. Однако спецификации, предоставляемые производителями, обычно не содержат полной информации, позволяющей рассчитать мощность солнечных панелей в различных условиях использования. Именно поэтому необходимо создать модель солнечной панели, которая позволит нам рассчитать мощность солнечных батарей в различных условиях, основываясь на общих данных, представленных в технической документации панелей.

В предыдущих работах нами была предложена методика построения модели солнечной панели на основе данных, представленных в техническом документе солнечной панели. В этой статье продемонстрирована повторяемость предложенного метода и применяемость его к солнечной панели BP4180T производства BP Solar. Результаты этой улучшенной модели сравнены с результатами предыдущей модели и с данными, представленными в техническом документе интересующей солнечной панели.

Анализ полученных результатов показывает применимость и повторяемость работы предложенной модели.

Ключевые слова: моделирование солнечных панелей, фотоэлектрические элементы, система тестирования, солнечная энергия, физические потери в солнечных панелях.

ISSN 0002-306X. Proc. of the RA NAS and NPUA Ser. of tech. sc. 2024. V. LXXVII, N1

UDC 621.382

MICROELECTRONICS

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.1-87

A.A. AVETISYAN, M.T. GRIGORYAN, A.V. MELIKYAN

BENCHMARKING AND IMPLEMENTING DEEP LEARNING ALGORITHMS ON FIELD PROGRAMMABLE GATE ARRAYS AND APLLICATION SPECIFIC INTEGRAL CIRCUIT PLATFORMS

Issues on the enhancement of Artificial Intelligence (AI) performance using Field-Programmable Gate Arrays (FPGA) and Application-Specific Integrated Circuits (ASIC) are studied. It focuses on benchmarking and implementing deep learning algorithms, crucial components of modern AI, on these advanced hardware platforms. The study begins with an explanation of the significance of deep learning in AI and the growing need for efficient computing platforms like FPGA and ASIC. These platforms are known for their high-speed processing capabilities and low power consumption, making them ideal for AI applications.

The research then delves into a detailed analysis of how deep learning algorithms can be optimized and executed on FPGA and ASIC platforms. It highlights the methods used to benchmark the performance of these algorithms on the mentioned hardware, providing a clear comparison with traditional computing systems. The paper also discusses the challenges and solutions in integrating deep learning algorithms into these specialized hardware environments.

Further, the advantages of using FPGA and ASIC for AI tasks, including improved processing speed, reduced energy consumption, and enhanced ability to handle complex AI computations are studied.

Keywords: FPGA, ASIC, artificial intelligence, neural networks.

Introduction. The field of artificial intelligence (AI) has seen an unprecedented acceleration in performance and efficiency, primarily driven by significant advancements in deep learning algorithms and their implementation on specialized hardware platforms. This paper delves into the comparative analysis and practical implications of deploying deep learning models on Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs) and Application-Specific Integrated Circuits (ASICs), two of the leading hardware platforms that offer distinct advantages for AI applications. It is predicted that the AI on chip market revenue will be rising exponentially in the coming decade [1] and will increase more than 13 times until 2032 (Fig. 1).

FPGAs, known for their flexibility and reconfigurability, present a compelling option for AI research and development, allowing for rapid prototyping and adaptation to evolving algorithmic needs. The adaptability of FPGAs to changing requirements and algorithms is discussed in-depth in the [2] works of Hauck and DeHon (2010), who highlight the architectural benefits and design considerations of FPGAs for computing tasks.



Fig. 1. AI on chip market revenue predictions

On the other hand, ASICs, with their specialized design tailored for specific applications, offer unmatched efficiency and performance for well-defined tasks. [3] explores the design space and optimization strategies for ASICs in AI, emphasizing the potential for achieving high throughput and energy efficiency in deep learning applications.

The core of this paper focuses on benchmarking the performance of deep learning algorithms when implemented on these platforms, considering metrics such as computational throughput, power consumption, and latency. Benchmarking efforts draw on the methodology outlined in [4] comprehensive analysis of deep learning benchmarks across various hardware platforms, providing a framework for evaluating FPGA and ASIC implementations. The data from [4] is summed up in Fig. 2.

By integrating insights from these reference papers, the current study offers a nuanced understanding of the trade-offs involved in choosing between FPGAs and ASICs for AI tasks. It examines how the inherent flexibility of FPGAs might be leveraged for experimental and evolving AI models, while the efficiency of ASICs could be harnessed for large-scale, high-performance applications with stable requirements. Furthermore, this paper contributes to the ongoing discourse on optimizing hardware architectures for AI by presenting case studies and empirical data on the implementation of cutting-edge deep learning algorithms on both FPGA and ASIC platforms. Through this analysis, it seeks to provide actionable insights for researchers and practitioners in the field of AI, guiding the selection and optimization of hardware platforms for diverse AI applications.



Fig. 2. Pros and cons of FPGA against ASIC

Incorporating an examination of benchmarking methods into the discourse on the implementation of deep learning algorithms on FPGA and ASIC platforms is essential, especially given the inherent challenge of establishing equivalency between disparate FPGA models and ASIC designs. This paper extends its analysis to address these benchmarking intricacies, adopting a multi-faceted approach to navigate the heterogeneity of hardware specifications and performance metrics.

Benchmarking deep learning implementations on FPGAs and ASICs involves a nuanced methodology that accounts for not only raw performance metrics such as computational throughput (in operations per second) and power efficiency (in operations per watt), but also factors like programmability, scalability, and the adaptability of the hardware to evolving deep learning models. The complexity of this task is amplified by the diversity in FPGA architectures and the specificity of ASIC designs, which necessitates a standardized yet flexible benchmarking framework. In essence, the benchmarking methodology outlined in this paper is designed to provide a fair comparison of FPGA and ASIC platforms for deep learning applications. By addressing the challenge of establishing equivalency between heterogeneous hardware platforms, this approach enables a more informed decision-making process for researchers and practitioners in the field of AI, guiding the selection of the most suitable hardware for specific deep learning tasks and objectives.

Method. To perform proper benchmarking between FPGA device and ASIC design two aspects are compared:

• Power efficiency

• Maximum clock period

Of course, to ensure equivalent conditions for comparison several considerations must be made.

1. The same RTL code is used during synthesis for FPGA and ASIC design.

2. During synthesis and implementation stages, the same constraints are used for FPGA and ASIC design.

3. ASIC design uses a transistor library for the same technology and operating voltage as the FPGA device's internal logic. During the analysis stage both environments are simulated in a typical corner.

4. For both devices, the same generated RTL code is used. The RTL is generated by using several caffe models and executing IBM's AccDNN tool [5].

5. For FPGA, the RTL models are synthesized, implemented, and analyzed using Xilinx Vivado tool [6]. The board used in the research is Vitrix-7.

The flow used to achieve proper benchmarking between ASIC and FPGA is illustrated in Figure 3 which includes all mentioned steps. ASIC design is created and simulated by Synopsys Design Compiler tool [7] (Fig. 4). The technology used for the implementation is Synopsys Advanced Education Design 32/28 nanometer (nm) library, since it is the same one used for Virtix-7 FPGA boards. The transistor library is selected based on the operating voltage (1.05V), process (typical) and the transistor type (rvt). The constraint file between Vivado and Design Compiler tools is shared since both support the *.xdc format.



Fig. 3. FPGA vs ASIC benchmarking flow



Fig. 4. ASIC design synthesized by Design Compiler (on the left). Design placed on FPGA (on the right)

Experimental results. Several neural networks were passed through the mentioned flow (particularly cifar10 [8], vgg16 [9], yolo [10], Alexnet [11]). Both static and dynamic powers were measured and compared. Total power is equal to the sum of static and dynamic powers as shown in Figure 5.



Fig. 5. Power dissipation in ICs

$$S = \int_0^t V_{DD} I_{leak} \, dt, \tag{1}$$

where S is the static power dissipation, V_{DD} – the source voltage, I_{leak} – the total leakage current of the system.

$$D = \int_0^t C V_{DD}^2 f_c dt, \qquad (2)$$

where D is the dynamic power dissipation, C – the total switching capacitance of the circuit, V_{DD} – the source voltage, f_c – switching activity or frequency.

Finally, the total power dissipation, which is the sum of D and S will be:

$$E = D + S = \int_0^t (V_{DD} I_{leak} + C V_{DD}^2 f_c) dt.$$
(3)

The tools are measuring the system power based on equations (1), (2), (3), and the results are shown in Table I.

As can be seen from the results, all ASIC designs show significantly lower power consumption due especially in the dynamic domain. The main contributors to this reduction are optimized design, lower parasitic due to shorter and more efficient routing and clock paths.

The second aspect of benchmarking is the maximum clock frequency which directly impacts the computation capability of the design. Apart from the device limitations, the only entity which keeps the working frequency down is the slack represented in formula (4):

$$Slack = Arrival_time - Required_time,$$
 (4)

where Arrival_time is the time elapsed for a signal to arrive at a certain point.

Table 1

Platform	Power	cifar10	vgg16	yolo	Alexnet
Virtix-7	Dynamic	2,328	7,128	7,338	7,212
	Static	0,244	0,736	0,797	0752
ASIC	Dynamic	0,189	0,4859	0,5132	0,4808
	Static	0,0235	0,0849	0,0927	0,08997

Power measurement for several ANN implementations (in Watts)

The Required_time is the latest time at which a signal can arrive without making the clock cycle longer than desired.

The slack should always be positive, otherwise the design will not function properly.

Table 2

The maximum working frequency with the acceptable slack for several ANN implementations (in MHz)

Platform	cifar10	vgg16	yolo	Alexnet
Virtix-7	186,7	219,3	128,0	185.4
ASIC	568,4	472.3	232,9	281.9

Conclusion. This study has provided evaluation of deep learning algorithm performance on FPGA and ASIC platforms, highlighting the trade-offs between flexibility and efficiency. The findings demonstrate that while FPGAs offer adaptability and are conducive to research and development, ASICs excel in high-throughput, energy-efficient computations for established deep learning tasks. The benchmarking methodology adopted ensures a fair and informative comparison, considering factors such as power efficiency, clock frequency, and design area. The data shows improved power efficiency of ASIC designs compared to FPGA by average 90.2%. At the same time, ASIC designs have 67.5% higher clock frequency capability. The future work will expand on the implications of these findings for the design of more specialized hardware and the optimization of deep learning algorithms for these platforms. Also, microbenchmarking can be added to the methodology to increase the equivalency between the devices, and gain more insight into the further design optimizations.

REFERENCES

- 1. Presedence Research Pvt Ltd. Artificial Intelligence (AI) Chip Market Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2023-2032. Available: https://www.precedenceresearch.com/artificial-intelligence-chip-market 2022
- Hauck S. and DeHon A. Reconfigurable Computing: The Theory and Practice of FPGA-Based Computation.- San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann, 2008.- P. 129-155.
- Chen C.H., Knag P., Zhang Z. Characterization of heavy-ion-induced single-event effects in 65 nm bulk CMOS ASIC test chips// IEEE Transactions on Nuclear Science.-August 2014.-vol. 61, no. 5.
- Dai W. and Berleant D. Benchmarking Contemporary Deep Learning Hardware and Frameworks: A Survey of Qualitative Metrics // 2019 IEEE First International Conference on Cognitive Machine Intelligence (CogMI).- Los Angeles, CA, USA.-2019.- P. 148-155.- doi: 10.1109/CogMI48466.2019.00029.
- DNNBuilder: an Automated Tool for Building High-Performance DNN Hardware Accelerators for FPGAs/Xiaofan Zhang, Junsong Wang, Chao Zhu, Yonghua Lin, et al // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems.-April 2020.- Vol. 30, no. 4.- P. 123-136.
- 6. Xilinx, Inc., "Xilinx Vivado Design Suite" 2023. Available: https://www.xilinx.com/products/design-tools/vivado.html. Accessed: Jan. 31, 2024.
- Synopsys, Inc., "Synopsys Design Compiler", 2021. Available: https://www.synopsys.com/implementation-and-signoff/rtl-synthesis-test/designcompiler.html. Accessed: Jan. 31, 2024.
- 8. **Krizhevsky A.** Learning multiple layers of features from tiny images: Master's thesis.- Department of Computer Science, University of Toronto, 2009.
- Karen S., Andrew Z. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition.-2014.-arXiv 1409.1556v6.
- 10. Joseph Redmon, Ali Farhadi. YOLOv3: An Incremental Improvement.-University of Washington, 2018.
- 11. Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, Geoffrey Hinton. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks.-University of Toronto Canada, 2012.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 29.02.2024

Ա.Ա. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Մ.Տ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ա.Վ. ՄԵԼԻՔՅԱՆ

ԽՈՐ ՈՒՍՈՒՑՄԱՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄԵՐԻ ԹԵՄԱՏԻԿ ԾՐԱԳՐԱՎՈՐՎՈՂ ՓԱԿԱՆՆԵՐԻ ԶԱՆԳՎԱԾԻ ԵՎ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅԱՆԸ ԿՈՂՄՆՈՐՈՇՎԱԾ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ՝ ՀԱՐԹԱԿՆԵՐԻ ՎՐԱ ԻՐԱԿԱՆԱՑՈՒՄԸ ԵՎ ՀԱՄԵՄԱՏՈՒՄԸ

Ներկայացվել է արհեստական բանականության (ԱԲ) կատարողականի բարելավման վերաբերյալ ուսումնասիրություն՝ օգտագործելով թեմատիկ ծրագրավորվող փականների զանգվածները (ԹԾՓԶ) և կիրառությանը կողմնորոշված ինտեգրալ սխեմաներ (ԿԿԻՍ)։ Աշխատանքում ուշադրությունը կենտրոնացվել է այս սարքային հարթակներում խոր ուսուցման ալգորիթմների՝ ժամանակակից ԱԲ-ի կարևոր բաղադրիչների չափորոշման և ներդրման վրա։ Ուսումնասիրությունը սկսվում է ԱԲ-ում խոր ուսուցման նշանակության և արդյունավետ հաշվողական հարթակների, ինչպիսիք են ԹԾՓԶ-ն և ԿԿԻՍ-ր, ամող անհրաժեշտության ներկայացմամբ։ Այս հարթակները հայտնի են իրենց բարձր արագությամբ մշակվելու հնարավորություններով և էներգիայի ցածր սպառմամբ, ինչը դրանք դարձնում է ԱԲ հավելվածների իրականացման համար գերազանց միջավալը։ Հետազոտությամբ մանրամասն վերլուծվում է, թե ինչպես կարող են խոր ուսուցման այգորիթմները լավարկվել և գործարկվել ԹԾՓԶ և ԿԿԻՍ հարթակներում։ Ընդգծվում են նշված սարքավորումների վրա ալգորիթմների կատարողականությունը համեմատելու համար օգտագործվող եղանակները՝ ապահովելով հստակ համեմատություն ավանդական հաշվողական համակարգերի հետ։ Քննարկվում են նաև այս սարքային մասնագիտացված միջավայրում խոր ուսուցման այգորիթմների ներառման մարտահրավերներն ու լուծումները։ Հետազոտվում են ԱԲ առաջադրանքների համար ԹԾՓՉ-ի և ԿԿԻՍ-ի օգտագործման առավելությունները, ներառյալ մշակման բարելավված արագությունը, էներգիայի կրձատված սպառումը և բարդ ԱԲ հաշվարկներ կատարելու բարձրացված ունակությունը։

Առանցքային բառեր. թեմատիկ ծրագրավորվող փականների զանգվածներ, կիրառությանը կողմնորոշված ինտեգրալ սխեմաներ, արհեստական բանականություն, նեյրոնային ցանցեր։

А.А. АВЕТИСЯН, М.Т. ГРИГОРЯН, А.В. МЕЛИКЯН

РЕАЛИЗАЦИЯ И СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ НА ПЛАТФОРМАХ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ МАТРИЦ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Исследуются вопросы повышения производительности искусственного интеллекта (ИИ) с использованием программируемых вентильных матриц (ПВМ) и интегральных схем специального назначения (ИССН). Основное внимание уделяется тестированию и внедрению алгоритмов глубокого обучения, важнейших компонентов современного искусственного интеллекта, на этих передовых аппаратных платформах. Исследование начинается с объяснения значения глубокого обучения в ИИ и растущей потребности в эффективных вычислительных платформах, таких как ПВМ и ИССН. Эти платформы известны своими возможностями высокоскоростной обработки и низким энергопотреблением, что делает их идеальными для приложений искусственного интеллекта. Затем исследование углубляется в подробный анализ того, как алгоритмы глубокого обучения могут быть оптимизированы и реализованы на платформах ПВМ и ИССН. В нем освещаются методы, используемые для оценки производительности этих алгоритмов на упомянутом оборудовании, обеспечивая четкое сравнение с традиционными вычислительными системами. Обсуждаются проблемы и решения по интеграции алгоритмов глубокого обучения в эти специализированные аппаратные среды. Изучаются преимущества использования ПВМ и ИССН для задач ИИ, включая повышение скорости обработки, снижение энергопотребления и расширение возможностей обработки сложных вычислений ИИ.

Ключевые слова: программируемые вентильные матрицы, интегральные схемы специального назначения, искусственный интеллект, нейронные сети.

ISSN 0002-306X. Proc. of the RA NAS and NPUA Ser. of tech. sc. 2024. V. LXXVII, N1

UDC 621.382

MICROELECTRONICS

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.1-97

H.T. KOSTANYAN, A.S. SAHAKYAN, H.K. GEVORGYAN, S.K. GHULYAN

DESIGNING A HIGH BANDWIDTH LOW NOISE VOLTAGE MODE DRIVER

During recent years wireline data speed rapidly increased, and data rate limits reached 112 *Gb/s* making power, noise, and reliability requirements tighter. Modern systems should be flexible to perform on various frequencies and support multiple protocols keeping proper data quality on the output. For high-speed data transmission, modern circuits use the PAM4 signaling method instead of NRZ to reach a higher bandwidth, by keeping lower clk and data rates. PAM4 data transmission method makes all mentioned parameters' variation range even more strict. Parasitic components of the circuit make it hard to reach enough bandwidth required for proper clock and data transfer.

Keywords: SERDES, transmitter, voltage mode driver, clock, receiver, PAM4.

Introduction. Nowadays, demand for high speed SERDES interface IPs is increasing at a tremendous speed. Recent developments in AI, IOT and cloud computing require data transmission speed up to 224 Gb/s. One of the main challenges for robust data transmission in high speed SERDES systems is bandwidth limitation. Recent developments propose to use PAM4 signaling to increase data-rate without any bandwidth overhead. Using Quadrature clocking in both transmitter and receiver is also being widely used. This approach allows to have lower operati-ng clock frequency. Quadrature clocking architecture results in numerous design challenges in the transmitter. The most important part during transmitter design with quadrature clocking architecture is 1UI pulse generation. Fig. 1 demonstrates how 1UI generation is being done using 4 phase clocks. Using a quarter rate muxing circuit instead of 2:1 method allows to achieve twice the higher data frequency of mux output without its input clock and data frequency change, from another point of view, the design of such a circuit could be more complex.

1UI generation is mainly performed in pre-driver circuits. There are several well-known approaches to 1UI generation for both voltage mode and current drivers [1-3]. These circuits should properly pass the provided information for each data phase keeping rail-to-rail signal and proper bandwidth. Additionally, as the overall specification becomes more stringent for greater data speeds, it is essential to design cells with low signal jitter.



High signal noise could alter the output data edge positions causing high biterror rates and errors in the data package.

Fig. 1. The 1UI data generation process

To overcome the described issues, an inverter with resistance feedback is adopted which improves the overall bandwidth of the circuit and decreases the output data jitter [4].

When the Miller effect is taken into consideration, Rfin and Rfout might be used to represent feedback resistance (Fig. 2).



Fig. 2. The inverter with resistive feedback

$$R_{F,in} = \frac{R_F}{1 - Av} = \frac{R_F}{1 + A_0},$$
(1)

$$R_{F,out} = \frac{R_F}{1 - \frac{1}{Av}} = \frac{R_F}{1 + \frac{1}{A_0}}.$$
 (2)

In the equations above $A_{\nu}(=-A_0)$ illustrates the small signal gain of the inverter. Using this feedback, the output time constant of 4:1 MUX will be decreased by shunting the output resistance with Rfin.

From another point of view, with a decreased input impedance of the inverter results in lower signal swing on its input. Additional signal buffering will bring back the signal swing to the proper value.

The proposed design. To cover the PCIe6 data rate, the proposed pre-driver (Fig. 3) is designed in SAED (Synopsys Armenia Educational Department)14-nm technology to operate at a frequency of 16 GHz which is enough to pass the 64 Gb/s bandwidth in the PAM4 mode. A resistance tuning option will be included to make it possible to run the pre-driver for even higher frequencies. For standards with lower frequencies where 4:1 MUX bandwidth is enough, a feedback resistor can be disabled to prevent the crowbar current, hence, additional current consumption.



Fig. 3. 4:1 mux with feedback resistor

4:1 mux is designed to receive 4 phase data coming from serializer circuit aligned with 4 clock phases. Each data line is controlled by two 90-degree shifted clocks. The circuit consists of inverters controlled by NAND and NOR circuits, inverters could be set at high-z state while NAND and NOR signals are the corresponding signals. Each data line passes input data allowed by its input clock signals.

To enable signal folding while the driver is deactivated in power down (PD) mode, an extra input signal control circuit was added. It is composed of independent NAND and NOR logics that serve as switches for power-off and operational modes. Both cells transmit data while in functional mode, but when in PD mode, they pull down 4:1 MUX P and N inputs to logic high and low levels. As a result, the general 4x1 MUX circuit is deactivated regardless of the clock signal, and fake data switching is prevented.

This will result in a high Z state at the 4x1 mux output in PD mode, causing the crowbar current to flow through the feedback resistor even in power-down mode. To avoid such issues, the resistor itself will also be deactivated in such circumstances. To prevent a high Z state, the output point could be pulled to 0 or logic high level.

The data are following up to the main muxing part where the clock signals are used as controls to pass for each data line. Clock signals need to be aligned to have 90-degree phase shift. As there are 4 data phases shifted towards each other for 90-degree, clock signals for each mux are chosen to serialize each input data without crossing each other. Clock and data paths routings should be designed carefully not to add additional phase error between signals, paths should be perfectly matched and avoid unnecessary couplings.

Mux logic on its turn consists of NAND and NOR parts, these cells receive data and data inverse signals correspondingly, therefore output stage PINV/NINV transistors receive opposite signals on their input.

In the power-down mode, PINV and NINV are disabled, the output signal is not driven and pulled to a high-impedance state. Transistor sizes are chosen carefully to provide a minimal load for clock and data routes and guarantee proper functionality.

Feedback resistor with its switches. After MUX, driving inverter with designed feedback resistor logic is used (Fig. 4) to reach the appropriate bandwidth, the designed logic allows to choose a feedback resistance value for multiple frequencies, which also has a function to be disabled and use the inverter as a buffering stage. The designed mux bandwidth is enough to operate in 8 *GHz* frequency providing rail-to-rail signal at its output, also the signal jitter is low, and, using a feedback resistance solution will add additional power consumption to the circuit, therefore its disabled. This frequency is enough to have a functional driver solution for PCIe4 standard operating at the NRZ mode.



Fig. 4. Implementation of a resistive feedback inverter

Looking at PCIe5 and PCIe6, it is known that the first standard uses NRZ signaling and requires a 16 *GHz* signal at the driver input. PCIe6 standard in its turn uses the PAM4 method to achieve 64 *Gb/s* data rate using the same frequency at pre-driver. In this case, MUX itself drives poor signal, with ~1 *ps* data jitter on its output. These values are not acceptable, the feedback resistance circuit should be switched ON, with a correctly chosen resistance value.

As described correctly the chosen resistance value will put the MUX bandwidth in the proper point, making output signal noise lower, the buffering stage brings back degraded signal levels to the proper logic levels.

The resistance value changed to find the optimal point where data jitter and its quality are presented properly, lowering the resistance value too much will increase the block power. By lowering resistance signals, logic levels also degraded, therefore additional buffering can be necessary to drive the signal back to rail-to-rail values which also affects power consumption.

For this design, 4.6 *kOhms* resistance value was chosen for 16 *GHz* operational mode, and signal levels are decreased ~150 *mV* at the MUX output with 213 *fs* jitter values, after buffering signal levels reaching rail with data noise 400 *fs* (Fig. 5). Looking forward to allowing 112 *Gb/s* data transmission input data is set to 7 *GHz* with 14 *GHz* 4 phase clock combination. Receiving such a signal on its input MUX will drive, the 28 *GHz* signal which will allow the driver to drive the 56 *Gb/s* signal in NRZ mode and 112 *Gb/s* in the PAM4 mode [5-7], this speed corresponds to modern die-to-die PHYs solutions, where data transmission speed is higher than 100 *Gb/s*.

To perform in such frequencies, an additional resistor with its switches is added to the design, which will allow choosing the proper calibrated resistance value for each frequency.



Fig.5. The feedback resistor output signal before and after the 4.6 kOhms resistor enables

Calibrated with 1.7 *kOhms* MUX delivers a signal with 410 *fs* noise buffering stage decreasing 6 *ps* noise value without the proposed solution. After buffering, the driver stage would receive a 700 *fs* data jitter signal with proper logic levels (Fig. 6).



Fig. 6. Feedback resistor output signal before and after the 1.7kOhms resistor enables

The finalized noise and power values are presented in Tables 1 and 2 correspondingly [8].

Table 1

<i>Noise values and power consumption for</i>	r 16GHz
---	---------

		Feedback	Feedback
16 <i>GHz</i> signal	Parameters	OFF	ON
	MUX output jitter [fs]	1000	213
	Jitter after signal buffering [fs]	1200	400
	MUX current consumption $[\mu A]$	446	534

Table 2

		Feedback	Feedback
28 <i>GHz</i> signal	Parameters	OFF	ON
	MUX output jitter [fs]	>6000	410
	Jitter after signal buffering [fs]	>6000	700
	MUX current consumption $[\mu A]$	690	781

Noise values and power consumption for 28 GHz

In [4], the studies show the data-dependent jitter at the feedback resistor output signal before and after enabling the 450 *Ohm* resistor for the 30 *GHz* frequency, which is enough to support the 56 *Gb/s* data rate in the 40-nm technology. The compared noise results are presented in Table 3.

Table 3

Noise value comparison for 28GHz and 30GHz

	Feedback	Feedback
Parameters	OFF	ON
28 GHz signal MUX output jitter [fs]	>6000	410
30 GHz signal MUX output jitter [fs]	5200	170

Conclusion. As a result, the designed feedback resistance logic in SAED 14nm technology not only delivers good quality signals in high frequencies but also gives the flexibility to choose optimal values of resistance for each frequency giving the advantage of not losing additional current between the operation modes. With only one resistance on feedback, the circuit will be designed to pass only the highest frequency possible (112 *Gb/s*), there will be high current consumption because of the crowbar current of the inverter even in low frequencies (64 *Gb/s*) where higher resistance values are enough to pass the signal.

REFERENCES

- Celik F., Akkaya A., Tajalli A. and Leblebici Y. A 32-Gb/s PAM-4 SST Transmitter With Four-Tap FFE Using High-Impedance Driver in 28-nm FDSOI // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. - June 2021. - Vol. 29, no. 6. -P. 1132-1140.
- A 2.29pJ/b 112Gb/s Wireline Transceiver with RX 4-Tap FFE for Medium-Reach Applications in 28nm CMOS/ B. Ye, et al // 2022 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC).- San Francisco, CA, USA, 2022. -P. 118-120.
- A 4.63pJ/b 112Gb/s DSP-Based PAM-4 Transceiver for a Large-Scale Switch in 5nm FinFET/ H. Park et, al // 2023 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC).- San Francisco, CA, USA, 2023. -P. 5-7.

- Peng P.-J., Chen Y.-T., Lai S.-T., and Huang H.-E. A 112-Gb/s PAM-4 Voltage-Mode Transmitter With Four-Tap Two-Step FFE and Automatic Phase Alignment Techniques in 40-nm CMOS // IEEE Journal of Solid-State Circuits. - July 2021. - Vol. 56, no. 7. -P. 2123-2131.
- A 40-to-64 Gb/s NRZ Transmitter With Supply-Regulated Front-End in 16 nm FinFET/ Y. Frans, et al // IEEE Journal of Solid-State Circuits. - Dec. 2016. -Vol. 51, no. 12. -P. 3167-3177.
- Roshan-Zamir A., Elhadidy O., Yang H.-W., and Palermo S. 16/32 Gb/s Dual-Mode NRZ/PAM4 SerDes in 65-nm CMOS // IEEE Journal of Solid-State Circuits - Sept. 2017. -Vol. 52, no. 9. - P. 2430-2447.
- 3.5 A 16-to-40Gb/s quarter-rate NRZ/PAM4 dual-mode transmitter in 14nm CMOS/ J. Kim, et al // 2015 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), Digest of Technical Papers.- San Francisco, CA, USA, 2015. -P. 1-3.
- 8. Hspice Reference Manual, Synopsys Inc. 2017. -846p.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 29.03.2024.

Հ.Տ. ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ, Ա.Ս. ՍԱՀԱԿՅԱՆ, Հ.Խ. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Ս.Կ. ՂՈՒԼՅԱՆ

ԲԱՐՁՐ ԹՈՂՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՄԲ, ԱՂՄԿԱԿԱՅՈՒՆ ԼԱՐՄԱՆ ՌԵԺԻՄՈՎ ՀԱՂՈՐԴՉԻ ԵԼՔԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄԸ

Վերջին տարիներին տվյալների հաղորդման արագությունն աձել է՝ հասնելով մինչև 112 ԳԲ/վրկ-ի, ինչի արդյունքում խստացել են հզորության, աղմուկի և հուսալիության նկատմամբ սահմանվող պահանջները։ Ժամանակակից համակարգերը պետք է լինեն ձկուն, որպեսզի կարողանան, պահպանելով ելքային ազդանշանի որակը, աշխատել տարբեր հաձախականություններով։ Տվյալների արագ փոխանցման համար ժամանակակից սխեմաները NRZ-ի փոխարեն օգտագործում են PAM4 ազդանշանային մեթոդը՝ ավելի մեծ թողունակության հասնելու համար, պահպանելով տակտային ազդանշանի և տվյալների ցածր հաձախությունը։ PAM4 մոդուլյացիայի դեպքում էլ ավելի է փոքրանում վերոնշյալ բոլոր պարամետրերի թույլատրելի շեղման միջակայքը։ Շղթայի մակաբուծական բաղադրիչները դժվարացնում են բավարար թողունակության հասնելը, որն անհրաժեշտ է պատշաձ տակտային ազդանշանի և տվյալների փոխանցման համար։

Առանցքային բառեր. SERDES, հաղորդիչ, լարման ռեժիմ տրամաբանությամբ հաղորդիչ հանգույց, տակտային ազդանշան, ընդունիչ հանգույց, PAM4:

А.Т. КОСТАНЯН, А.С. СААКЯН, А.Х. ГЕВОРГЯН, С.К. ГУЛЯН РАЗРАБОТКА ДРАЙВЕРА РЕЖИМА НАПРЯЖЕНИЯ С ВЫСОКОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ И НИЗКИМ ШУМОМ

В последние годы скорость передачи данных по проводной сети быстро росла, а пределы скорости передачи данных достигли 112 ГБ/с, что ужесточило требования к мощности, шуму и надежности. Современные системы должны быть гибкими, чтобы работать на различных частотах и поддерживать несколько протоколов, сохраняя надлежащее качество данных на выходе. Для высокоскоростной передачи данных современные схемы используют метод сигнализации РАМ4 вместо NRZ, чтобы достичь более высокой пропускной способности за счет снижения тактовой частоты и скорости передачи данных. Метод передачи данных РАМ4 делает диапазон изменения всех упомянутых параметров еще более строгим. Паразитные компоненты схемы затрудняют достижение достаточной пропускной способности, необходимой для правильной синхронизации и передачи данных.

Ключевые слова: SERDES, передатчик, драйвер режима напряжения, тактовый сигнал, приемник, РАМ4.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Ս.Ա., ԴԱՎԻԴՅԱՆ Ա.Կ., ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Ա.Ս., ՀԱԿՈԲՅԱՆ Ա.Ռ.,	
UU5UI'8UU S.U.	
ՄՈԼԻԲԴԵՆԻ ԴԻՍԻԼԻՑԻԴԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ՝	-
	5
ԱՂԲԱԼՑԱՆ Ս.Գ., ՎԱՍԻԼՑԱՆ Գ.Ա., ԱՂԲԱԼՑԱՆ Ա.Ս., ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Ս.Ա.,	
<u></u>	
ՏԱՔ ԱՐՏԱՄՂՄԱՄԲ ՍՏԱՑՎԱԾ ԱՄՐԱՆԱՎՈՐՎԱԾ ՁՈՒԼՄԱՆ ԱԼՅՈՒՄԻՆԱՅԻՆ	
ԴԵՖՈՐՄԱՑՎՈՂ ՀԱՄԱՁՈՒԼՎԱԾՔՆԵՐԻ ՋԵՐՄԱՑԻՆ ՄՇԱԿՄԱՆ	10
ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՆԵՐԻ ՀԵՏԱՉՈՏՈՒՄԸ	12
ՄՈՎՍԻՍՅԱՆ Բ.Վ.	
C12A7/CA ԵՎ CaF2, AlF3 ֆՏՈՐԻԴՆԵՐԻ ՀԱՐԱԲԵՐԱԿՑՈՒԹՅԱՆ ԱՉԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ	
ԱԼՈՒՄԻՆԱՏԱՅԻՆ ՑԵՄԵՆՏԻ ՀԻԴՐԱՏԱՑՄԱՆ ԵՎ ԱՄՐԱՑՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ	
ՎՐԱ	21
ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ Լ.Ա., ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ Լ.Ս.	
ՀԱՆՔԱԹԵՔԱՏՈՎ ՏԱՐԲԵՐ ԽՈՆԱՎՈՒԹՅԱՄԲ ՀԱՆՔԱՔԱՐԻ ԹՈՂԱՆՑՄԱՆ	
ԴԵՊՔՈՒՄ ԲԱՑԱՀԱՆՔԻԸՆԴՈՒՆՄԱՆ ՀՐԱՊԱՐԱԿՈՒՄ ԱՊԱՐԱԿՏՈՐՆԵՐԻ	20
	29
	36
	50
	16
	40
0 כנו אסעט ע.ט., אמג טאסעט ע.ע., עוויאַ עטסעט ט.ע., עמצעו סעט ע.ע., 1	
	50
	58
ԲԱԲԱՑԱՆ Ա.Վ., ՇՈՒՔՈՒՐՑԱՆ Ս.Կ.	
ՈՒՍՈՒՑԱՆՎՈՂ ՄԵԹՈԴԱԲԱՆՈՒԹՅՈՒՆ ՀԻՇՈՂ ՍԱՐՔԵՐԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ	
ԿԱՊՈՒՂՈՎ ՆԵՐԿԱՌՈՒՑՎԱԾ ԻՆՔՆԱԹԵՍՏԱՎՈՐՄԱՆ ԼՈՒԾՈՒՄՆԵՐԻ	
ՎԱՎԵՐԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱՐ	69
ՍԻՄՈՆՅԱՆ Ա.Տ., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Օ.Հ., ՄՈՒՐԱԴՅԱՆ Ս.Տ.	
ԱՐԵՎԱՅԻՆ ՎԱՀԱՆԱԿԻ ՄԵԿ-ԴԻՈԴ ՀԻՆԳ -ՊԱՐԱՄԵՏՐ ՄՈԴԵԼԻ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅՈԻՆԸ՝	
ՀԱՇՎԻ ԱՌՆԵԼՈՎ ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԿԱԽՎԱԾՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ	77
ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Ա.Ա., ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Մ.Տ., ՄԵԼԻՔՅԱՆ Ա.Վ.	
ԽՈՐ ՈՒՍՈՒՑՄԱՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄԵՐԻ ԹԵՄԱՏԻԿ ԾՐԱԳՐԱՎՈՐՎՈՂ ՓԱԿԱՆՆԵՐԻ	
ԶԱՆԳՎԱԾԻ ԵՎ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅԱՆԸ ԿՈՂՄՆՈՐՈՇՎԱԾ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ	
ՀԱՐԹԱԿՆԵՐԻ՝ ՎՐԱ ԻՐԱԿԱՆԱՑՈՒՄԸ ԵՎ ՀԱՄԵՄԱՏՈՒՄԸ	87
ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ Հ.Տ., ՄԱՀԱԿՅԱՆ Ա.Ս., ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Հ.Խ., ՂՈՒԼՅԱՆ Ս.Կ.	
ԲԱՐՁՐ ԹՈՂՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՄԲ, ԱՂՄԿԱԿԱՅՈՒՆ ԼԱՐՄԱՆ ՌԵԺԻՄՈՎ ՀԱՂՈՐԴՉԻ	
ԵԼՔԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄԸ	97

СОДЕРЖАНИЕ

АРУТЮНЯН С.А., ДАВИДЯН А.К., ГРИГОРЯН А.С., АКОБЯН А.Р.,	
САФАРЯН Т.Н.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДИСИЛИЦИДА МОЛИБДЕНА	_
ОЧИСТКОИ МОЛИБДЕНИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ	5
АГБАЛЯН С.Г., ВАСИЛЯН Г.А., АГБАЛЯН А.С., АРУТЮНЯН С.А.,	
ВАРДАНЯН Н.В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АРМИРОВАННЫХ	
АЛЮМИНИЕВЫА ДЕФОРМИРУЕМЫА ЛИТЕИНЫА СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫА	12
ТОРУЧИМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ	12
ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ С ₁₂ А7/СА И ФТОРИДОВ СаF ₂ И АIF ₃ НА ПРОЦЕСС	01
ТИДРАТАЦИИ И ТВЕРДЕНИЯ ГЛИНОЗЕМИСТОГО ЦЕМЕНТА	21
МАНУКЯН Л.А., БАЛАСАНЯН Л.С.	
ОБОСНОВАНИЕ РАССТОЯНИЯ ПОЛЕТА КУСКОВ РУДЫ НА ПРИЕМНОИ	
ПЛОЩАДКЕ КАРЬЕРА ПРИ ПЕРЕПУСКЕ ПО РУДОСКАТУ ГОРНОЙ МАССЫ	
РАЗНОЙ ВЛАЖНОСТИ	29
АГАРОНЯН Г.А., ОВСЕПЯН В.Г.	
РЕГУЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА ПРИ ОТБОЙКЕ УСТУПОВ	24
КАРЬЕРА РАЗЛИЧНОИ БЛОЧНОСТИ	36
ГРИГОРЯН Т.А., АИВАЗЯН М.Ц.	
АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ ЦИФРОВЫХ	
МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ	46
МЕЛИКЯН В.Ш., ГАЛСТЯН А.А., ГУКАСЯН С.А., КАЗАРЯН А.А.,	
КАРАПЕТЯН Э.Е.	
РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ	
СИНТЕЗЕ ДЕРЕВА СИНХРОСИГНАЛА	58
БАБАЯН А.В., ШУКУРЯН С.К.	
ОБУЧАЕМАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ВАЛИДАЦИИ РЕШЕНИЙ ПО ВСТРОЕННОМУ	
САМОТЕСТИРОВАНИЮ УСТРОЙСТВ ПАМЯТИ ЧЕРЕЗ РАЗДЕЛЯЕМЫЙ	
ИНТЕРФЕЙС	69
СИМОНЯН А.Т., ПЕТРОСЯН О.А., МУРАДЯН С.Т.	
ПРИМЕНЕНИЕ ОЛНОЛИОЛНОЙ ПЯТИПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОЛЕЛИ	
СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ	
ЗАВИСИМОСТЕЙ	77
АВЕТИСЯН А А., ГРИГОРЯН М.Т., МЕЛИКЯН А.В.	
ΡΕΔΠИЗΔΙΙИЯ И СРАВНЕНИЕ ΔΠΟΟΡИТМОВ ΓΠΥΓΟΚΟΓΟ Ο ΕΥΥΕΗИЯ ΗΔ	
ΠΙΔΤΦΩΡΜΔΥ ΠΡΩΓΡΔΜΜИΡΥΕΜΗΥ ΒΕΗΤИΠΗΗΥ ΜΔΤΡИΙΙ И	
ΜΗΤΕΓΡΑ ΙΙΔΗΣΙΧ CXEM CΠΕΙΙΝΑ ΙΙΔΗΟΓΟ Η Δ 3Η ΔΥΕΗΝЯ	87
КОСТАНЯНАТ СААКЯНАС ГЕВОРГЯНАХ ГУЛЯНСК	07
Α Ο ΕΛΤΡΑΙ Α.Τ., Ο ΑΑΚΛΙΠΑ.Ο., ΓΕΡΟΓΓΛΠΑ.Α., ΓΥ ΜΑΠΟ.Κ. DA 2DA ΕΛΤΚΑ ΠDA ЙΒΕDΑ DEWIMA Η ΑΠDOWEUMO Ο DUCOVOŇ ΠDΟΠΛΟΥΠΟЙ	
ΤΑ ΣΙ ΑΒΟΤΚΑ ДΓΑΡΙΔΕΓΑ ΓΕΛΥΙΝΙΑ ΠΑΠΕΣΙΜΕΠΡΙΣΙ Ο DDICOROPHIPOLIS CKHOP	07
СПОСОБНОСТЬЮ И НИЗКИМ ШУМОМ	97

CONTENTS

HARUTYUNYAN S.A., DAVIDYAN A.K., GRIGORYAN A.S.,	
HAROBYAN A.K., SAFARYAN I.N. INVESTIGATING THE MOLYBDENUM DISILICIDE PRODUCTION PROCESS BY	
MOLYBDENITE CONCENTRATES	5
AGBALYAN S.G., VASILYAN G.A., AGBALYAN A.S., ARUTYUNYAN S.A.,	
VARDANIAN N.V.	
INVESTIGATING THE THERMAL TREATMENT PROCESSES OF REINFORCED	
ALUMINUM DEFORMABLE CASTING ALLOYS OBTAINED BY HOT	
EXTRUSION	12
MOVSISYAN B.V.	
THE IMPACT OF THE C12A7/CA RATIO AND THE FLUORIDE CaF2 AND AIF3 ON THE	
PROCESS OF HYDRATION AND HARDENING OF ALUMINA CEMENT	21
MANUKYAN L.A., BALASANYAN L.S.	
JUSTIFICATION OF THE FLIGHT DISTANCE OF ORE PIECES AT THE RECEIVING	
SITE OF THE QUARRY AT PASSING OF THE ROCK MASS OF DIFFERENT HUMIDITY	
THROUGH THE ORE ROLL	29
AHARONYAN G.A., HOVSEPYAN V.G.	
REGULATION OF THE EXPLOSION ENERGY ACTIVITY AT EXPLOSION OF MINES	
OF DIFFERENT OCCUPANCY BLOCKS	36
GRIGORYAN T.A., AIVAZYAN M.TS.	
AUTOMATIC DETECTION AND RECOGNITION OF DIGITAL MODULATED SIGNALS	
USING A NEURAL NETWORK	46
MELIKYAN V.Sh., GALSTYAN A.A., GHUKASYAN S.A., GHAZARYAN A.A.,	
KAKAPETYAN E.E.	
DEVELOPMENT OF PARAMETERIZED MODEL OF LOGIC ELEMENTS AT CLOCK	50
IKEE SYNTHESIS	58
BABAYAN A.V., SHOUKOUKIAN S.K.	
LEARNING METHODOLOGY FOR VALIDATION OF MEMORY BIST SOLUTIONS VIA	(0
A SHAKED IN LEKFACE	69
SIMONTAN A.L., PETROSTAN O.H., MUKADTAN S.I.	
APPLICATION OF TEMPERATURE DEPENDANCES OF PARAMETERS IN A SINGLE-	
DIODE FIVE-PARAMETER MODEL OF SOLAR PANELS	//
AVE IIS YAN A.A., GRIGORYAN M.I., MELIKYAN A.V.	
BENCHMARKING AND IMPLEMENTING DEEP LEARNING ALGORITHMS ON FIELD	
PROGRAMMABLE GATE ARRAYS AND APLLICATION SPECIFIC INTEGRAL	07
UKUII PLAIFUKMS	δ/
KUSTAINTAIN H.I., SAHAKTAIN A.S., GEVUKGTAN H.K., GHULTAN S.K.	
DESIGNING A HIGH BANDWIDTH LOW NOISE VOLTAGE MODE	07
UKIVEK	97
ՀԵՂԻՆԱԿՆԵՐԻ ՑՈՒՑԱԿ

1 Ահարոնյան Գագիկ Անուշավանի	տ.գ.թ., հորատապայթեցման աշխատանքների
	ղեկավար, «Ա.Ա.Բ. ՊՐՈՅԵԿՏ» ՓԲԸ
	Էլ. հասցե - gagik.aharonyan@mail.ru
2՝ Աղբալյան Ալլա Սուրենի	կրտսեր գիտաշխատող, ՀԱՊՀ
	Էլ. hաugե - aghbalyan@gmail.com
3 Աղբալյան Սուրեն Գևորգի	տ.գ.դ., պրոֆեսոր, Մետալուրգիայի և
	նյութագիտության ամբիոն, ՀԱՊՀ
	Էլ. հասցե - metalsur@polytechnic.am
4 Այվազյան Մարտին Ցոլակի	տ.գ.դ., պրոֆեսոր, Ռադիոսարքավորումների և
	կապի համակարգերի ամբիոն, ՀԱՊՀ
	Է. հասցե - aivazyan@mail.ru
5 Ավետիսյան Աշոտ Ազատի	ասպիրանտ ՀԱՊՀ, ավ. ինժեներ «Սինոփսիս
	Արմենիա» ՓԲԸ
	Է. հասցե - aavet@synopsys.com
6 Բաբայան Արմեն Վրեժի	հետազոտությունների և մշակումների գծով ավ.
	ինժեներ, «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ
	Էլ. հասցե - ababaya@synopsys.com
7 Բալասանյան Լուսինե Սուրիկի	տ.գ.դ., ասիստենտ, Հանքարդյունաբերության
	ամբիոն, Կապանի մասնաձյուղ, ՀԱՊՀ
	էլ. հասցե - lusbalasanyan.78@mail.ru
8 Գալստյան Արման Աշոտի	ասպիրանտ ՀԱՊՀ, մասնագիտացված ինտեգրալ
	սխեմաների ֆիզիկայի նախագծման գծով հաստի-
	քային ինժեներ «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ, ՀԱՊՀ
	Էլ. հասցե - armanga@synopsys.com
9 Գրիգորյան Արմինե Սաշայի	տ.գ.թ. դասախոս, Ալավերդու արհեստագործա-
	կան պետական ուսումնարան,
	Էլ. հասցե - armingrig1977@inbox.ru
10 Գրիգորյան Մուշեղ Տարոնի	ասպիրանտ ՀԱՊՀ, ինժեներ – ղեկավար
	«Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ
	Է. հասցե - mushegg@synopsys.com
11 Գրիգորյան Տիգրան Արամի	ասպիրանտ ՀԱՊՀ, «Նեյշնլ Ինսթրումենթս
	Արմենիա» ՍՊԸ, «Հեռահաղորդակցական ցանցեր,
	սարքավորումներ և համակարգեր», Ինտեգրացիոն
	լուծումների գծով ինժեներ 3,
	Էլ. հասցե - grigoryan970@gmail.com
12 Գևորգյան Հայկ Խաչիկի	մագիստրանտ, Տեղեկատվության անվտանգութ-
	յան և ծրագրային ապահովման ամբիոն ՀԱՊՀ
	Էլ. հասցե - haykgevorgyan201@gmail.com

13 Դավիդյան Արթուր Կարենի	գիտաշխատող, Ընդհանուր և անօրգանական ռեւքիայի ինասիրութ, ՀՀՕՍԱ
14 Կարապետյան Էրիկ Երվանդի	քրսիայի իսսսիսուս, ՀՀ ԳԱԱ Էլ. հասցե - artur.davidyan21@gmail.com բակալավր, ՀԱՊՀ, անալոգային համակարգերի կոնստրուկտավորման ինժեներ, «Սինոփսիս Արմենիա» ΦԲԸ,
15 Կոստանյան Հարություն Տիգրանի	էլ. հասցե - kerik@synopsys դասախոս, միկրոէլեկտրոնային սխեմաների և համակարգերի ամբիոն, ՀԱՊՀ, անալոգային նախագծման հաստիքային ինժեներ «Սինոփսիս Արմենիա» ΦԲԸ, ՀԱՊՀ
16 Հակոբյան Ասյա Ռաֆայելի	էլ. հասցե - harutyk@synopsys.com ՀՀ ԳԱԱ Ընդհանուր և անօրգանական քիմիայի ինստիտուտ, կրտսեր գիտաշխատող
17 Հարությունյան Մամվել Ալբերտի	էլ. հասցե - assia77@yandex.ru մագիստրանտ, Մետալուրգիայի և նյութագի- տության ամբիոն, ՀԱՊՀ,
18 Հարությունյան Սիրանուշ Աշոտի	էլ. հասցե - samo.harutyunyan7@mail.ru տ.գ.թ., գիտաշխատող, Ընդհանուր և անօրգանա- կան քիմիայի ինստիտուտ, ՀՀ ԳԱԱ
19 Հովսեփյան Վահե Գևորգի	էլ. հասցե - sirhar@mail.ru Լեռնատեխնիկական ծառայության լեռնային պլանավորման և նախագծման բաժնի պլանա-
20 Ղազարյան Արթուր Արայիկի	վորման ինժեներ, ԶՊԿ էլ. հասցե - vahehovs@bk.ru ասպիրանտ, ՀԱՊՀ, մասնագիտացված ինտեգրալ սխեմաների ֆիզիկական նախագծման հաստիքա- յին ինժեներ, «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ, ՀԱՊՀ
21 Ղուլյան Մարգիս Կարենի	էլ. հասցե - gartur@synopsys.com անալոգային նախագծման ինժեներ, «Սինոփսիս Ամենիա» ՓԲԸ, ԵՊՀ բակալավր
22 Ղուկասյան Մևակ Արշակի	էլ. հասցե - ghulyan@synopsys.com տ.գ.թ., ՀԱՊՀ, անալոգային սխեմաների նախա- գծման ինժեներ, «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ, ՀԱՊՀ
23 Մանուկյան Լևոն Անդրանիկի	էլ. հասցե - ghukasya@synopsys.com տ.գ.դ., դոցենտ, Լեռնային գործի և շրջակա միջավայրի պահպանության ամբիոն, ՀԱՊՀ,
24 Մելիքյան Անուշ Վազգենի	Էլ. hwugt - manukyanlevon-a@rambler.ru տ.գ.թ., դոցենտ, ՀԱՊՀ Էլ. hwugt - anush-melikyan@yandex.ru 110
	1.1.7

25 Մելիքյան Վազգեն Շավարշի	տ.գ.դ. պրոֆեսոր, ՀԱՊՀ «Միկրոէլեկտրոնային
	սխեմաներ և համակարգեր» ամբիոնի վարիչ, ՀՀ
	ԳԱԱ թղթակից անդամ, ՀՀ գիտության վաստա-
	կավոր գործիչ, Համալսարանական ծրագրերի
	տնօրեն, «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ,
	էլ. huugt - vagenm@synopsys.com
26 Մովսիսյան Բագրատ Վահեի	ասպիրանտ, Մ.Գ. Մանվելյանի անվան ընդհանուր
	և անօրգանական քիմիայի ինստիտուտ, ԳԱԱ
	႕. hաugե - <u>bagrat.movsisyan@polytechnic.am</u>
27 Մուրադյան Սերոբ Տարոնի	ֆ-մ. գ. թ. դոցենտ, ՀԱՊՀ,
	Ҷ. hшugt - smuradyan@polytechnic.am
28 Շուքուրյան Սամվել Կիմի	ֆ.մ.գ.դ., պրոֆեսոր, «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ,
	«Ներկառուցված թեստավորում և վերանորոգում»
	ստորաբաժանման ղեկավար, ԵՊՀ, ՏՏԿՀ
	կենտրոնի գիտական ղեկավար, ԳԱԱ անդամ,
	Է. հասցե - samshouk@synopsys.com
29 Պետրոսյան Օլեգ Հարությունի	տ. գ. դ. պրոֆ. ՀԱՊՀ, ԷԿԲՉՀ ամբ. վարիչի պ/կ
	էլ. hաugե - o.petrosyan@polytechnic.am
30 Սահակյան Արթուր Ստեփանի	Հայ-Ռուսական համալսարանի դասախոս,
	տ.գ.թ., դոցենտ, անալոգային սխեմաների նախա-
	գծման ավագ ձարտարագետ «Ատլաս մագնեթիքս
	թեքնոլոջի» ՓԲԸ,
	Էլ. հասցե - art.sah.stp@gmail.com
31 Սաֆարյան Տաթևիկ Նիկոլայի	ՀՀ ԳԱԱ Ընդհանուր և անօրգանական քիմիայի
	ինստիտուտ, գիտաշխատող, տ.գ.թ.
	էլ. հասցե - for.tatevik@gmail.com
32 Սիմոնյան Արփի Տիգրանի	ՀԱՊՀ, Ասպիրանտ
	էլ. hաugե - arpi.simonyanpolytech.am
33 Վասիլյան Գայանե Արտաշի	տ.գ.թ., դոցենտ, Մետալուրգիայի և նյութագիտու-
	թյան ամբիոն, ՀԱՊՀ
	Է. huugե - gayavasi@gmail.com
34 Վարդանյան Նարինե	մագիստրանտ, Մետալուրգիայի և նյութագիտու-
Վարուժանի	թյան ամբիոն, ՀԱՊՀ,
	ҵ. hшugt - narvardanyan19@gmail.com

СПИСОК АВТОРОВ

1 Аветисян Ашот Азатович	аспирант, НПУА; инженер - эксперт, разработчик аналоговых и смежных сигнальных схем
	ЗАО "Синопсис Армения".
	Эл. почта - aavet@synopsys.com
2 Агаронян Гагик Анушаванович	к.т.н., начальник буровзрывных работ, ЗАО "А.А.Б. ПРОЕКТ",
	Эл. почта - gagik.aharonyan@mail.ru
3 Агбалян Алла Суреновна	младший научный сотрудник, НПУА,
	Эл. почта - aghbalyan@gmail.com
4 Агбалян Сурен Геворкович	д.т.н., профессор, кафедра Металлургии и материаловедения, НПУА,
	Эл. почта - metalsur@polytechnic.am
5 Айвазян Мартин Цолакович	д.т.н., профессор, Кафедра радиотехники и систем связи НПУА,
	Эл. почта - aivazyan@mail.ru
6 Акобян Ася Рафаеловна	младший научный сотрудник, Институт общей и неорганической химии НАН РА,
	Эл. почта - assia77@yandex.ru
7 Арутюнян Самвел Альбертович	магистрант, кафедра Металлургии и материаловеде- ния, НПУА,
	Эл. почта - samo.harutyunyan7@mail.ru
8 Арутюнян Сирануш Ашотовна	к.т.н., научный сотрудник, Институт общей и
	неорганической химии НАН РА,
	Эл. почта - sirhar@mail.ru
9 Бабаян Армен Врежович	старший инженер по исследованиям и разработкам, ЗАО "Синопсис Армения",
	Эл. почта - ababaya@synopsys.com
10 Баласанян Лусине Суриковна	к.т.н., ассистент, кафедра Горной промышленности, Капанский филиал, НПУА,
	Эл. почта - lusbalasanyan.78@mail.ru
11 Варданян Нарине Варужановна	магистрант, кафедра Металлургии и материало- ведения, НПУА,
	Эл. почта - narvardanyan19@gmail.com
12 Василян Гаяне Арташевна	к.т.н., доцент, кафедра Металлургии и материало- ведения, НПУА,
	Эл. почта - gayavasi@gmail.com
13 Галстян Арман Ашотович	аспирант, НПУА; штатный инженер по
	физическому проектированию специализированных интегральных схем, ЗАО "Синопсис Армения",
	Эл. почта - armanga@synopsys.com
14 Геворгян Айк Хачикович	магистрант, НПУА,
	Эл. почта - haykgevorgyan201@gmail.com
15 Григорян Армине Сашаевна	к.т.н., преподаватель, Алавердское государственное ремесленное училище, Эл. почта - armingrio 1977@inbox ги

16 Григорян Мушег Таронович	аспирант, НПУА; инженер-менеджер, разработчик
	аналоговых и смежных нтегральных схем руководи-
	тель, ЗАО "Синопсис Армения",
	Эл. почта - mushegg@synopsys.com
17 Григорян Тигран Арамович	аспирант, НПУА; ООО "Нэйшнл Инструментс
	Армения", инженер - 3 по интегральным решениям,
	Эл. почта - grigoryan970@gmail.com
18 Гукасян Севак Аршакович	к.т.н., НПУА; штатный инженер по
	конструированию аналоговых систем, ЗАО
	"Синопсис Армения",
	Эл. почта - ghukasya@synopsys.com
19 Гулян Саргис Каренович	бакалавриат, ЕГУ; инженер по аналоговому
	проектированию, ЗАО "Синопсис Армения",
	Эл. почта - ghulyan@synopsys.com
20 Давидян Артур Каренович	научный сотрудник. Институт общей и
	неорганической химии НАН РА.
	Эл. почта - artur davidvan21@gmail.com
21 Казарян Артур Араикович	аспирант НПVA: старший инженер по физическому
	проектированию специализированных интегральных
	схем ЗАО "Синопсис Армения"
	A HOUTE gartur@synopsys.com
22 Vanagaray Drug Ennaggan	
22 Карапетян Эрик Ервандович	студент бакалавриата тпту А, инженер конструиро-
	вания аналоговых систем, SAO Синопсис
	Армения,
	Эл. почта - kerik@synopsys.com
23 Костанян Арутюн Тигранович	преподаватель, кафедра Микроэлектронных схем и
	систем, НПУА; штатный инженер по аналоговому
	проектированию, ЗАО "Синопсис Армения",
	Эл. почта - harutyk@synopsys.com
24 Манукян Левон Андраникович	д.т.н., доцент, кафедра Горного дела и охраны
	окружающей среды", НПУА,
	Эл. почта - manukyanlevon-a@rambler.ru
25 Меликян Ануш Вазгеновна	к.т.н., доцент, НПУА
	Эл. почта - anush-melikyan@yandex.ru
26 Меликян Вазген Шаваршевич	д.т.н., профессор, зав. кафедрой Микроэлектронных
	схем и систем Национального политехнического
	университета Армении, член-кор. НАН РА, директор
	университетских программ, ЗАО "Синопсис Армения",
	Эл. почта - vagenm@synopsys.com
27 Мовсисян Баграт Вагеевич	аспирант. Институт общей и неорганической химии
r i r	им. М.Г. Манвеляна НАН РА.
	Эл. почта - bagrat.movsisvan@polytechnic.am
28 Муралян Сероб Таронович	к.фм.н., лоцент, НПУА.
- ,rr	Эл. почта - smuradyan@polytechnic.am
29 Овсепян Ваге Геворгович	инженер-планировшик горно-планировочного
	отлела горно-технической службы ЗМК
	Эт понт а - vabeboxe@bk m
	JI. HUTIA - VAICHUVS WUK.IU

30 Петросян Олег Арутюнович	д.т.н., профессор, и.о. кафедрой Электроники,
	биомедицинских и измерительных систем, НПУА,
	Эл. почта - o.petrosyan@polytechnic.am
31 Саакян Артур Степанович	к.т.н., доцент, РАУ; ст. инженер по аналоговому
	проектированию, ЗАО "Атлас маркетинг технолоджи",
	Эл. почта - art.sah.stp@gmail.com
32 Сафарян Татевик Николаевна	к.т.н., научный сотрудник, Институт общей и
	неорганической химии НАН РА,
	Эл. почта - for.tatevik@gmail.com
33 Симонян Арпи Тиграновна	аспирант, НПУА,
	Эл. почта - arpi.simonyanpolytech.am
34 Шукурян Самвел Кимович	д.фм.н., профессор, действительный член НАН РА,
	ЗАО "Синопсис Армения", директор отдела программ
	вложенного тестирования и восстановления ЕГУ,
	научный руководитель Образовательного и исследо-
	вательского центра информационных технологий,

Эл. почта - samshouk@synopsys.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. Chair of "Metallurgy and Material
		Science", NPUA,
		E-mail - metalsur@polytechnic.am
3	Aharonyan Gagik Anushavan	Cand. of tech. sci., Head of drilling and blasting operations,
		CJSC "A.A.B. PROJECT"
		E-mail - gagik.aharonyan@mail.ru
4	Avetisyan Ashot Azat	Post-graduate student, NPUA, senior engineer "Synopsys
		Armenia" CJSC
		E-mail - aavet@synopsys.com
5	Ayvazyan Martin Tsolak	Cand. of tech. sci. Prof. Chair of Radio Engineering and
		Communication Systems, NPUA
		E-mail - aivazyan@mail.ru
6	Babayan Armen Vrej	Senior Research and Development Engineer, "Synopsys
		Armenia" CJSC
		E-mail - ababaya@synopsys.com
7	Balasanyan Lusine Surik	Cand. of tech. sci. Kapan Branch of NPUA"Chair of Mining
		Industry"Assistant
~		E-mail - lusbalasanyan.78@mail.ru
8	Davidyan Arthur Karen	Research worker, NAS RA, Institute of General and Inorganic
		Chemistry,
•		E-mail - artur.davidyan21@gmail.com
9	Galstyan Arman Ashot	Post-graduate student, NPUA, Engineer on Physical Design of
		Integrated Circuits Synopsys Armenia CJSC,
10		E-mail - armanga@synopsys.com
10	Gevorgyan Hayk Khachik	Graduate student of Information Security and Software
		Provision Chair of NPUA,
11		E-mail - naykgevorgyan201@gmail.com
11	Gnazaryan Artur Arayık	Post-graduate student, NPUA, Engineer on Physical Design of
		Integrated Circuits Synopsys Armenia CJSC, NPUA
10	Charles array Sarrah Archala	E-mail - gartur@synopsys.com
12	Gnukasyan Sevak Arsnak	E meil skylassys @symposys Armenia CJSC, NPUA
12	Chulture Same Kanan	E-mail - gnukasya@synopsys.com
13	Gnulyan Sargis Karen	Y SU Institute of Physics Specialization in the design of
		super-large integrated circuits, Faculty of Radiophysics fourin-
		Armonio" CISC
		E meil skuluer@supergus.som
14	Crigoryon Arming Sasha	E-man - gnuryan@synopsys.com
14	Grigoryan Arnine Sasha	Aleverdi State Vecetional School Jecturer
		F mail armingrig1077@inhov m
15	Grigoryan Mushach Taron	L-man - anninging 1977 (@ moox.ru
13	Grigoryan Musnegn Taron	Armonio ² CISC
		Armenia USU
		E-man - musnegg@synopsys.com

16 Grigoryan Tigran Aram	Post-graduate student, "Telecommunication networks, equipment and systems", Senior Solution Engineer 3, NPUA,
	National Instruments Armenia LLC
	E-mail - grigoryan970@gmail.com
17 Hakobyan Asya Rafayel	Junior research worker, Institute of General and Inorganic
	Chemistry, NAS RA,
	E-mail - assia77@yandex.ru
18 Harutyunyan Samvel Albert	Graduate student, Chair of "Metallurgy and Material Science", NPUA,
	E-mail - samo.harutyunyan7@mail.ru
19 Harutyunyan Siranush Ashot	Cand. of tech.sci., research worker, Institute of General and
	Inorganic Chemistry, NAS RA,
	E-mail - sirhar@mail.ru
20 Hovsepyan Vahe Gevorg	ZCC, Design engineer of the Mining Planning Department of
	the Mining and Technical Service
	E-mail - vahehovs@bk.ru
21 Karapetyan Erik Yervand	Undergraduate Student of NPUA, Analog design engineer
	"Synopsys Armenia" CJSC,
	E-mail - kerik@synopsys.com
22 Kostanyan Harutyun Tigran	Lecturer of Microelectronic Circuits and Systems Chair of
	NPUA, analog design staff engineer "Synopsys Armenia"
	CJSC,
	E-mail - harutyk@synopsys.com
23 Manukyan Levon Andranik	Dr. of tech. sci., Assoc. Prof., Chair of Mining and Nature
	Protection, Institute if Mining and Metallurgy and Chemical
	Technologies", NPUA
	E-mail - manukyanlevon-a@rambler.ru
24 Melikyan Anush Vazgen	Cand. of tech. sci., Assoc. Prof., NPUA
, C	E-mail - anush-melikyan@yandex.ru
25 Melikyan Vazgen Shavarsh	Dr. of tech. sci., Prof., Head of Microelectronic Circuits and
	Systems Chair of NPUA, Corresponding Member of National
	Academy of Sciences of Armenia, Honorable Scientist of
	Armenia, Director of University Programs "Synopsys
	Armenia" CJSC,
	E-mail - vagenm@synopsys.com
26 Movsisyan Bagrat Vahe	Post-graduate student of the Institute of General and Inorganic
, ,	Chemistry, NAS RA after M.G. Manvelyan
	E-mail - bagrat.movsisyan@polytechnic.am
27 Muradyan Serob Taron	Cand. of Phys-math sci., Assoc. Prof., NPUA
5	E-mail - smuradvan@polytechnic.am
28 Petrosvan Oleg Harutvun	Dr. of tech. sci., Prof., Head of the chair of "Electronics.
	Biomedical and Measurement systems" NPUA
	E-mail - o.petrosvan@polytechnic.am
29 Safarvan Tatevik Nikolav	Cand. of tech.sci., research worker, Institute of General and
	Inorganic Chemistry, NAS RA
	E-mail - for.tatevik@gmail.com

30 Sahakyan Artur Stepan	Cand. of tech. sci., Assoc. Prof. of Russian-Armenian
	university, senior engineer analog design "Atlas marketing
	technology "CJSC,
	E-mail - art.sah.stp@gmail.com
31 Shoukourian Samvel Kim	Dr. of Phys-math sci., Prof., "Synopsys Armenia"
	CJSC, Director of the Department of Embedded Test and
	Repair, YSU, Scientific supervisor of Information
	Technologies Educational and Research Center, Academician
	of NAS RA,
	E-mail - samshouk@synopsys.com
32 Simonyan Arpi Tigran	Post-graduate student, NPUA
	E-mail - arpi.simonyanpolytech.am
33 Vardanyan Narine Varujan	Graduate student, Chair of "Metallurgy and Material Science",
	NPUA,
	E-mail - narvardanyan19@gmail.com
34 Vasilyan Gayane Artash	Cand. of tech. sci., Assoc. Prof. of the Chair "Metallurgy and
	Material Science", NPUA,
	E-mail - gayavasi@gmail.com

«Հայաստանի գիտությունների ազգային ակադեմիայի և Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի տեղեկագիր. տեխնիկական գիտությունների սերիա» հանդեսում տպագրվում են տեսական և փորձարարական հետազոտությունների արդյունքները տեխնիկական գիտությունների հետևյալ բաժիններից՝ մեքենաշինություն, մետալուրգիա, նյութագիտություն, ընդերքօգտագործման տեխնոլոգիաներ, շինարարական կառուցվածքներ, հիդրավլիկա և հիդրոտեխնիկական կառույցներ, էներգետիկա, էլեկտրատեխնիկա, գիտական սարքաշինություն և չափողական տեխնիկա, հաշվողական տեխ նիկա 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, ралиоэлектроника, 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 eqeupment, 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.

ՀՈԴՎԱԾՆԵՐԻ 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, УДК, 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 (անոտացիա) 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։ Բանաձները 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 անվանհայրանվան սկզբնատառերը՝ bold, «Գրականության ցանկ» արտահայտությունը՝ տողի կենտրոնում, գլխատառերով։ ծանկում 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 աստի-Ճանը, 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 "*Puc.*", "*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.

 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, Linespacing -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 ($2S\Omega$, $V \square K$, 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

ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ

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

1

żusnr τομ 77 Volume

Հրատ. Խմբագիր՝ Խմբագիրներ՝ JENUARY - MARCH

ԺԱՆՆԱ Ս. ՍԵՑՐԱՆՑԱՆ

Հ.Ց. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ՀበՒՆՎԱՐ - ՄԱՐՏ

ЯНВАРЬ – МАРТ

Հ.Չ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

Ստորագրված է տպագրության՝ 04.06.2024 Թուղթը՝ «օֆսեթ»։ Տպագրությունը՝ ռիզո։ Ֆորմատ՝ (70×100) 1/16։ Շարվածքը՝ համակարգչային։

Տառատեսակը՝ Sylfaen, Times New Roman: 7.6 տպ. մամ.։

Պատվեր՝ 138։ Տպաքանակ՝ 150

Հայաստանի Ազգային Պոլիտեխնիկական Համալսարանի «Պոլիտեխնիկ» տպագրահրատարակչություն Երևան, Տերյան 105 Типографско-
издательский центр
«Политехник»"Polytechnic" Publishing – House
National Polytechnic University of
ArmeniaНационального
политехнического
университета Армении105 Teryan str. Yerevan

polytechpolygraph@gmail.com

Ереван, ул. Теряна 105,