

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И

НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԵՐԵՎԱՆ

ЕРЕВАН

Журнал издается с 5.01.1948 г.

Выходит 4 раза в год

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Ռ.Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ (գլխավոր խմբագիր), **Հ.Ա. ԹԵՐԶՅԱՆ** (գլխ. խմբ. տեղակալ), **Զ.Կ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ** (պատասխանատու քարտուղար), **Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ**,
Ռ.Վ. ԱԹՈՅԱՆ, **Վ.Վ. ԲՈՒՆԻԱՏՅԱՆ**, **Ժ.Դ. ԴԱՎԻԴՅԱՆ**, **Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ**,
Ս.Մ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ, **Ո.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ**, **ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ**, **Վ.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ**,
Ս.Հ. ՄԻՍՈՆՅԱՆ, **Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ**, **Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р.М. МАРТИРОСЯН (главный редактор), **А.А. ТЕРЗЯН** (зам. глав. редактора),
З.К. СТЕПАНЯН (ответственный секретарь), **С.Г. АГБАЛЯН**,
Р.В. АТОЯН, **В.В. БУНИАТЯН**, **Ж.Д. ДАВИДЯН**, **С.П. ДАВТЯН**, **С.М. КАЗАРЯН**,
В.З. МАРУХЯН, **Ю.Л. САРКИСЯН**, **В.С. САРКИСЯН**,
С.О. СИМОНЯН, **М.Г. СТАКЯН**, **В.С. ХАЧАТРЯН**

EDITORIAL BOARD

R.M. MARTIROSSYAN (Editor-in-Chief), **H.A. TERZYAN** (Vice-Editor-in-Chief),
Z.K. STEPANYAN (Secretary - in - Chief), **S.G. AGHBALYAN**,
R.V. ATOYAN, **V.V. BUNIATYAN**, **Zh.D. DAVIDYAN**, **S.P. DAVTYAN**,
S.M. GHAZARYAN, **V.Z. MARUKHYAN**, **YU.L. SARGSYAN**, **V.S. SARKISSYAN**,
S.H. SIMONYAN, **M.G. STAKYAN**, **V.S. KHACHATRYAN**

Հրատ. խմբագիր՝

ԺԱՆՆԱ ՍԵՅՐԱՆՅԱՆ

Համակարգչային շարվածքը
և ձևավորումը՝

ԼԻԼԻԹ ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆԻ

Խմբագիրներ՝

ԼԵՅԼԱ ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ
ՆԵԼԼԻ ԱՆԱՆՅԱՆ

© Издательство ГИУА

Известия НАН и ГИУ Армении (сер. техн. наук), 2008

Ն Վ Ի Բ Վ ՈՒ Մ Է

Հայաստանի պետական ճարտարագիտական համալսարանի (Պոլիտեխնիկ)

75-ԱՄՅԱԿԻՆ



Ո.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ

ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ՔԱՅԼՔԸ ՇԱՐՈՒՆԱԿՎՈՒՄ Է

Հայաստանի պետական ճարտարագիտական համալսարանը (Պոլիտեխնիկ) բոլորեց իր հիմնադրման 75 տարին: 1933թ. փետրվարի 27-ին Հայկոմկուսի Կենտկոմը և կառավարությունը ընդունեցին որոշում նույն թվականի մարտի 1-ից միավորել Հայաստանի շինարարական և քիմիատեխնոլոգիական ինստիտուտները և դրանց հիմքի վրա ձևավորել Երևանի պոլիտեխնիկական ինստիտուտը (ԵրՊԻ)՝ երկու ֆակուլտետով:

Երևանի պոլիտեխնիկականի լինելության պահից սկսած՝ հաստատության գործունեության հիմնական ուղղություններն էին՝

- բարձրորակ մասնագետների պատրաստման ապահովումը,
- գիտահետազոտական աշխատանքների կատարումը,
- բարձրորակ ուսումնական ձեռնարկների, դասագրքերի և մենագրությունների ստեղծումը,

- պրոֆեսորադասախոսական կադրերի որակավորման բարձրացումը:

Հիմնադրման պահին պոլիտեխնիկականում գործող երկու ֆակուլտետները ունեին ընդամենը 107 ուսանող: Այդ ֆակուլտետները կոչված էին ինժեներական կադրերով ապահովելու բառի բուն իմաստով շինարարական հրապարակի վերածված հանրապետության շինինդուստրիան և բուռն զարգացող քիմիական արդյունաբերությունը:

Նորաստեղծ կրթօջախի գործունեությունը, բնականաբար, սերտորեն պետք է կապվեր խորհրդային երկրում սոցիալիզմի հիմքերի կառուցման, նրա արդյունաբերական ենթակառուցվածքների ստեղծման հետ: Այսինքն՝ Պոլիտեխնիկը դարձավ մեր

երկրի արդյունաբերության մշտական ուղեկիցը, և չպետք է անտեսել նաև այն իրողությունը, որ այդ ոլորտի հաջողությունները միաժամանակ և փոխադարձաբար պայմանավորված էին ԵրՊԲ-ի ընդլայնմամբ ու զարգացմամբ:

Կրթօջախը արագընթաց զարգանում էր, ստեղծվում էին նոր ֆակուլտետներ, ամբիոններ ու մասնագիտություններ: Տնտեսության զարգացմանը զուգընթաց՝ աստիճանաբար ընդլայնվեցին ընդունելության պլանները, զգալիորեն աճեց ուսանողական համակազմը: Միանգամայն օրինաչափորեն Պոլիտեխնիկականը ընդլայնեց իր տարածաշրջանային աշխարհագրությունը: Ստեղծվեցին Պոլիտեխնիկի մասնաճյուղերը՝ 1959թ. Լենինականում (Գյումրիում) և Կիրովականում (Վանաձորում), 1984թ. Գորիսում (որը 2005թ. դարձավ ինքնուրույն հաստատություն), 1985թ. Կապանում:

Ուրույն դերակատարություն ունեցավ հաստատության Երևանի էլեկտրամեքենաշինական գործարանին կից մասնաճյուղը, որը ստեղծվեց 1960թ. հուլիսին՝ երեկոյան ուսուցման մասնաճյուղի կարգավիճակով, 4 մասնագիտությունների գծով: Մասնաճյուղը մոտ 14 տարի պատվով կատարեց իր առաքելությունը: Արտաերևանյան ստորաբաժանումների շարքում չպետք է անտեսել 1972թ. Ռադիոէլեկտրոնիկայի ֆակուլտետի հիմքի վրա Դիլիջան քաղաքում բացված և մինչև 90-ականների սկիզբը գործած բաժանմունքը, որի բուռն գործունեության տարիներին այստեղ ուսանում էին հարյուրավոր երիտասարդներ Դիլիջանից և մերձակա շրջաններից: 1988թ. համաժողովրդական զարթոնքի օրերին Պոլիտեխնիկը Լեռնային Ղարաբաղում հիմնեց իր բաժանմունքը, ապա մասնաճյուղը, որը հետագայում տեղի մանկավարժականի հետ համատեղ դարձավ Արցախի պետական համալսարանի կազմավորման հիմքը: 1985թ. պոլիտեխնիկականի ուսանողական համակազմի թվաքանակը գերազանցեց 25 հազարը, որը կազմում էր հանրապետության բուհական ուսանողության շուրջ 40%-ը: Այդ տարիներին ինստիտուտում ուսանում էին ավելի քան 20 երկրների թվով 450 ուսանողներ:

Հգորանալով և ձեռք բերելով միութենական և միջազգային լայն ճանաչում, Պոլիտեխնիկը հսկայական ներգործություն ունեցավ Հայաստանի արդյունաբերական և գիտատեխնիկական առաջընթացի վրա, երկրին տվեց ինժեներների, գիտնականների, արտադրության ղեկավարների մի քանի սերունդ:

Այսօր նաև պատեհ պահն է մեր հարգանքի տուրքը մատուցելու Պոլիտեխնիկի առաջին սերնդի այն լեգենդար դասախոսներին ու գիտնականներին, ովքեր կերտեցին մեր բուհի առանձնակի ու ուրույն նկարագիրը, նրա մնայուն ավանդույթներն ու արժեքները և փոխանցեցին դրանք սերնդեսերունդ:

Նրանք են՝ Ալեքսանդր Թամանյան, Աշոտ Տեր-Մկրտչյան, Ստեփան Ղամբարյան, Ալեքսանդր Հակոբյան, Վրույր Թորգոմյան, Լևոն Ռոտինյան, Արտակ Տոնյան, Հովհաննես Նավակատիկյան, Հարություն Զաքյան, Նիկողայոս Բունիաթյան, Նազուշ Հարությունյան, Թորգոմ Խաչատրյան, Օգսեն Սապոնջյան, Գուրգեն Արարքցյան, Միքայել Վարունցյան, Մերգեյ Համբարձումյան, Վարազդատ Հարությունյան, Լիպարիտ Ղուլոյան. անուններ, որոնք թողել են անմոռանալի հետք սերունդների հիշողության մեջ և ընդմիջտ կմնան մեր բուհի և հայրենական ինժեներական կրթության ու գիտության պատմության մեջ:

Բուռն զարգացման ու վերելքից հետո իր պատմության խորհրդային շրջանը Պոլիտեխնիկն ավարտեց մեր ժողովրդին բաժին հասած փորձություններով ու մարտահրավերներով առլեցուն ժամանակաշրջանում: Արցախյան պատերազմը, ավերիչ երկրաշարժը, շրջափակումը, արդյունաբերական հզոր համալիրի կազմալու-

ծումը, բնականաբար, բացասաբար անդրադարձան նաև Պոլիտեխնիկական կառույցի գործունեության վրա:

Այդ շրջանում սովորական դարձած ցույցերը, դասադուլները, կոլեկտիվի բողոքի ժողովներն անխոս և՛ առաջ էին բերում ուսումնական բնականոն գործընթացի խաթարում, և՛ հետևաբար, ազդում ուսուցման որակի վրա:

Կրթօջախի հարյուրավոր ուսանողներ ոգու կանչով կամավոր մասնակիցը դարձան արցախյան ազատամարտի: Նրանցից շուրջ չորս տասնյակը զոհվեցին այդ գոյամարտում: Պատերազմի ընթացքում հին ու նոր սերնդի շատ պոլիտեխնիկացիներ զինվորագրվեցին հայկական նորաստեղծ բանակին և իրենց բոլոր կարելիությունները ի սպաս դրեցին մեր երկրի պաշտպանության սուրբ գործին: Երախտագետ բուհը Մեծ Հայրենականում զոհված պոլիտեխնիկացիների հուշակոթողի կողքին արծվակիր խաչ-քար-հուշարձանով հավերժացրեց արցախյան ազատամարտում զոհված իր հերոս ուսանողների ու շրջանավարտների հիշատակը: Նրանք պոլիտեխնիկական փառքի տարեգրության էջերում են, մեզ հետ և մեր հուշերում:

1990թ. մեր հաստատությունը թևակոխեց իր պատմության հետխորհրդային շրջանը, որի առաջին իսկ ամիսներին բացահայտվեց մեր կրթական կառույցների՝ ձևավորվող նոր տնտեսական կացութաձևին անպատրաստ լինելու իրողությունը: Հատկապես ճարտարագիտական կրթության բնագավառում անգնն աչքով իսկ տեսանելի էր դառնում նոր կրթական մոդելի՝ աշխատաշուկայի կարիքների հարաճուն փոփոխությանն արագորեն արձագանքող համակարգի ձևավորման անհրաժեշտությունը: Կարելի է արձանագրել, որ Հայաստանի անկախացումը և պոլիտեխնիկականի արմատական բարեփոխումների իրականացման սկիզբը ժամանակային առումով միմյանց համընկան: Այս փուլում իր առանձնահատուկ դերակատարությունը և ծանրակշիռ ներդրումը ունեցավ 1988թ. ռեկտոր ընտրված տ.գ.դ., պրոֆեսոր, այդ ժամանակ ՀՀ ԳԱԱ թղթակից անդամ Յուրի Սարգսյանը, որին վիճակված էր իր ուսերին տանել բարձրագույն տեխնիկական կրթության համակարգի կառուցվածքա-ծրագրային բարելավման պատասխանատու ու դժվարին առաքելությունը, դառնալ հանրապետությունում ճարտարագիտական կրթության արմատական բարեփոխումների նախաձեռնողն ու գաղափարախոսը:

Ժամանակի ու կյանքի հրամայականով 1991թ. նոյեմբերի 29-ին ՀՀ առաջին նախագահի թիվ ՆՀ-4 հրամանագրով հանձնարարվեց ՀՀ կառավարությանը Երևանի պոլիտեխնիկական ինստիտուտը վերակազմավորել Հայաստանի պետական ճարտարագիտական համալսարանի: ԵրՊԻ-ի անցումը համալսարանական կարգավիճակի ինքնանպատակ չէր և ոչ էլ տուրք արևմտյան կրթական մոդելներին: Հավասարապես կարևորելով ինչպես խորհրդային, այնպես էլ ազգային և համաշխարհային կրթական լավագույն փորձը, ընտրվել էր դրանց ներդաշնակ զուգորդման ու փոխլրացման ուղին: Հայաստանի կրթական համակարգի պատմության մեջ առաջին անգամ ՀՊՀՀ-ում սկիզբ դրվեց ուսուցման բազմաստիճան (եռաստիճան) կառուցվածքին: Ուսուցման առաջին երկու աստիճաններում՝ բակալավրատ և մագիստրատուրա, հաջորդաբար իրականացվում էին բարձրագույն կրթության ծրագրեր, իսկ երրորդ աստիճանում՝ հետազոտողի հետբուհական ծրագիրը: Սույն մոդելը աստիճանաբար ներդրվեց նաև ՀՀ այլ ուսումնական հաստատություններում, իսկ 1999թ. ստացավ համապատասխան օրենսդրական ամրագրում:

Կարևորում եմ նա մեկ իրողություն. համալսարանը արմատապես փոխեց իր մասնագիտությունների անվանացանկը՝ հնարավորինս դրանք խոշորացնելով, ընդլայնելով և դարձնելով համահունչ առկա պահանջարկին: Զուգահեռ ընթացան նաև կազմակերպական ու կառուցվածքային այլ լայնամասշտաբ փոփոխություններ: Արվածի արդյունքն ու արժեքն առավել գնահատելի են դառնում, երբ հետադարձ հայացքով անդրադարձ ենք կատարում այդ բարեփոխումների կատարման ժամանակահատվածում երկրում ստեղծված իրավիճակին. չհայտարարված պատերազմ, խորը շրջափակում, էներգետիկական համակարգի փաստացի կազմալուծում, կադրային աննախադեպ արտահոսք, գործազրկություն, դիմորդների արագընթաց նվազող հոսք:

Մակայն պոլիտեխնիկցիներն իրենց բնորոշ պատվախնդրությամբ ու արժանապատվությամբ անցան այս դժվարին փորձությունները նա, համախմբեցին բոլոր հնարավոր ներքին ռեսուրսները և 1995թ., ըստ էության, ավարտեցին համալսարանի վերակազմակերպման շրջանը:

1990-ական թթ. կեսերից հանրապետությունում արձանագրվեցին առաջին, թեպետ շատ փոքր, տեղաշարժերը սոցիալ-տնտեսական ոլորտում, բնականաբար, առաջ բերելով նաև որոշակի աշխուժացում կրթական համակարգում: Այս առումով կարելի է 1996թ.-ից հետո ընկած ժամանակահատվածը որակել որպես շարունակական վերելքի ու զարգացման փուլ, և բոլորովին էլ պատահական չէր, որ մշակվեց ու գործողության մեջ դրվեց համալսարանի առաջին ռազմավարական պլանը 1996-2000թթ. համար՝ «ՀՊՀՀ-ն 21 դարի նախաշեմին» հավակնոտ անվանումով:

Հավատարիմ մնալով պոլիտեխնիկական լավագույն ավանդույթներին, գնահատելով նախորդ հնգամյակում իրականացված բարեփոխումների արդյունավետությունը և քննախույզ վերլուծելով միջավայրային փոփոխությունները, մշակվեցին 7 հիմնական ռազմավարական նպատակները, ուրվագծվեցին դրանց իրագործման ուղիներն ու մեթոդները: Միանշանակ է, որ 1996-2000թթ. ռազմավարական պլանն ունեցավ էական ազդեցություն համալսարանի գործունեության բոլոր բնագավառների վրա և լինելով առաջինը ՀՀ բուհական համակարգում, արժանացավ Եվրախորհրդի փորձագետների բարձր գնահատականներին: Միևնույն ժամանակ պետք է ազնվորեն խոստովանել, որ այն գերծ չէր որոշակի, հատկապես կազմակերպչական բնույթի թերություններից, և պլանի իրականացումը նաև բացահայտեց որոշ կանխատեսումների ոչ իրատեսական լինելու հանգամանքը:

Վերը նշվածը հաշվի առնվեց հաջորդ՝ «ՀՊՀՀ -ն 21-րդ դարում» նորացված ռազմավարական պլանում, որում ուրվագծվածը առավել հեռահար նպատակներ էր հետապնդում: Այսօր գործողության մեջ է համալսարանի երրորդ՝ 2006-2010 թթ. ռազմավարական պլանը, որի մշակմանը նախորդող փուլը, ըստ էության, ներառել է համալսարանի գործունեության արդյունավետության մանրակրկիտ, ավելի քան 130 ցուցանիշների միջոցով ուսումնասիրությունը, արտաքին և ներքին միջավայրային գործոնների և արդյունավետության ցուցանիշների փոխազդեցության բացահայտումն ու գնահատումը: Զգալիորեն փոփոխվել են նպատակային հիմնախնդիրները, առանձնահատուկ ընդգծվում են ներուժի համալրման ու երիտասարդացման, ինֆրակառուցվածքի բարելավման և համալսարանի համակողմանի ինֆորմատացման առաջնությունները: Այսօր վստահորեն կարելի է արձանագրել, որ երկրորդ և գործող երրորդ ռազմավարական պլաններում առաջադրված նպատակային ուրվագծումների գերակշիռ մասի իրագործման արդյունքում ՀՊՀՀ-ի վարկանիշը մնում է կայուն և

բավականաչափ բարձր: Օրեցօր զարգացող ու երբեմն նաև հանիրավի ընդլայնվող մրցակցային դաշտում մեր հաստատության դիրքերը բավականաչափ ամուր են: Մասնագիտությունների խոշորացումը և թարմացումը, ծրագրային փաթեթների շարունակական նորացումը, ուսումնական գործընթացի կազմակերպչական նոր գործառույթների ներդրման ու հաջողությամբ իրագործման առաջանցիկ քայլերը համալսարանի՝ դեպի ապագան հաստատուն քայլքի վկայություններն են: 2008թ. սեպտեմբերի 1-ի տվյալներով ՀՊՃՀ-ի ուսանողական համակազմը մոտեցավ 11000-ին, ընդ որում, Երևանի կրթահամալիրում այն շուրջ 8000 է: Աննախադեպ էր բակալավրի կրթական ծրագրով այս տարվա ընդունելության արդյունքը, որը վերջին 5 տարիների կտրվածքով լավագույնն էր՝ 2159: Բացառիկ էր, թեպետ որոշակի գործոնների վերադրման հետևանքով, նաև մագիստրոսական ծրագրով ընդունելությունը՝ շուրջ 600: Այս տարի բուհը տվեց շուրջ 3000 շրջանավարտ: Բնականաբար, նման մեծաթիվ ուսանողական համակազմի համար ուսումնական գործընթացի արդյունավետ կազմակերպումը և իրականացումը համալսարանի անձնակազմից պահանջում է ուժերի գերազույն լարում և բոլոր ռեսուրսների համախմբում:

Համալսարանը հաջողությամբ է իրականացնում իր առաքելությունը՝ գործատու և գործընկեր կազմակերպությունների մի ամբողջ խմբի հետ փոխհամաձայնեցված գործողությունների շնորհիվ: Այսօր պահն է այդ խմբից առանձնացնել մի քանիսին: Գործատու կազմակերպության հետ համագործակցության յուրօրինակ ու հաջողված մոդել պետք է համարել տեղեկատվական տեխնոլոգիաների ժամանակակից ճյուղերից մեկի առաջատարի՝ «Մինոփսիս»-ի հետ մեր համագործակցության տարբերակը: Մա իրապես բուհ-արտադրություն հաջողված փոխշահավետ կապի փայլուն և արդեն ընդօրինակվող տարբերակ է, որն այսօր զարգացումների նոր փուլ է մտնում ուսումնառության լիարժեք քառամյա ծրագրի ներդրման ճանապարհով, բնականաբար, ենթադրելով ուսումնական պլանների ու առարկայական դասընթացների բովանդակային լուրջ վերաճզգրտումներ: Հաջող համագործակցությունը տեղեկատվական տեխնոլոգիաների ոլորտում իր արտահայտությունն է ստացել նաև մի շարք այլ գործընկեր կազմակերպությունների հետ իրագործվող ծրագրերում, մասնավորապես, «Լայքոս Արմենիա», «Մորսիո», «Վիրաժ-Լոջիք», «Սան Մայքրո սիսթեմս», «Յունիքումփ», «Մայքրոսոֆթ Ար Էյ», Տեղեկատվական տեխնոլոգիաների միություն, Ձեռնարկությունների ինկուբատոր հիմնադրամ: Արդյունավետ է համագործակցությունը Քաջարանի պղնձա-մոլիբդենային կոմբինատի հետ, որը, ըստ էության, ամբողջությամբ իր վրա է վերցրել մեր հաստատության կապանյան մասնաճյուղի՝ ժամանակի պահանջներին հարիր ինֆրակառուցվածքների ձևավորման հիմնախնդիրը, ամենայն աջակցություն է ցուցաբերում պրակտիկաների և մի շարք դասընթացների՝ անմիջականորեն արտադրական օբյեկտում կազմակերպմանը, իսկ վճարովի ուսանողական համակազմին ցուցաբերում է շոշափելի նյութական օգնություն: Բնականաբար, այս համագործակցությունը իր արտահայտություն է ստացել նաև Երևանի կրթահամալիրի ընդերքաբանության և մետալուրգիայի դեպարտամենտի կտրվածքով:

Ավանդաբար հաջողված և արդյունավետ են համալսարանի և ՀՀ էներգետիկ օբյեկտների համագործակցական ծրագրերը էլեկտրակայանների, էլեկտրական ցանցերի, ինչպես նաև համակարգի կառավարման կառույցների հետ: Այստեղ առանձնանում է Հայկական ԱԷԿ-ի հետ երկար տարիների փորձարկում անցած և այսօր բովանդակային նոր, որակական դրսևորումներ արձանագրող համագործակցությունը

ուսումնական և գիտամեթոդական բնագավառներում: Ատոմային էներգետիկայի բնագավառի փորձառու մասնագետներն անմիջական մասնակցություն են ունենում ուսումնական գործընթացի կազմակերպմանը, վարում հատուկ դասընթացներ, ղեկավարում ավարտական աշխատանքներ և այլն: Նկատելի է տեղաշարժ նաև քիմիատեխնոլոգիական մասնագիտությունների գծով, մասնավորապես իր առաջին պտուղներն է տալիս «Նաիրիտ»-ի հետ ավանդական կապերի վերականգնմանը նպատակաուղղված փոխշահագրգիռ գործառույթների իրականացումը, որի արդյունքում արտադրական օբյեկտում կստեղծվի համալսարանի համապատասխան դեպարտամենտի մասնաճյուղային կառույց: Համագործակցության ընդլայնմանն են միտված նաև պայմանագրային հարաբերությունների հաստատումը «Մաքուր երկաթ» գործարան ՓԲԸ-ի, «Արմենիան մոլիբդեն փրոդաքշն» ՍՊԸ, «Ռուսալ-Արմենալ», «Վալեքս գրուպ» ՓԲԸ-ի և այլ կազմակերպությունների հետ:

Այսօր համալսարանի առաջնահերթ խնդիրներից է բարձրացնել ուսուցման որակն ու արդյունավետությունը կրթական բոլոր ծրագրերի գծով՝ Բոլոնյան գործընթացի խնդիրներին համահունչ, և այս առումով պետք է առանձնացնել հետևյալ ձեռքբերումները՝

- ավարտվել է ՀՊՃՀ ուսուցման որակի գնահատման ու ապահովման ներքին-հական համակարգի և կազմակերպական սխեմայի մշակումը՝ համապատասխան կառուցվածքային միավորների և նրանց պարտականությունների ու գործառույթների հստակ տարանջատմամբ,

- սկսվել և 3 մասնաճյուղերում լրիվ, իսկ Երևանի կրթահամալիրում մասամբ ավարտվել է Համալսարանի կրթական ծրագրերն իրականացնող հիմնական ուսումնական ստորաբաժանումների գործունեության ինքնավերլուծության և որակի գնահատման ներհամալսարանական փուլային գործընթացը,

- ավարտվել են «Մասնագիտության թղթապանակի» ձևավորման աշխատանքները Ստոկհոլմի թագավորական տեխնոլոգիական և Թուրինի պոլիտեխնիկական համալսարանների հետ համատեղ իրականացվող «Ճարտարագիտական կրթության որակի ապահովման համապատասխանեցումը Բոլոնիայի պահանջներին» նախագծի շրջանակներում,

- հաջողությամբ ընթանում է կրեդիտային համակարգի ներդրման գործընթացը բակալավրի կրթական ծրագրի գծով. այդ նպատակով մշակվել, հրատարակվել և ուսանողներին են բաժանվել կրեդիտային ուսումնառության դեպարտամենտային հատուկ ուղեցույց-տեղեկագրքեր՝ բոլոր մոդուլ-դասընթացների ստանդարտ համառոտագրերով և կրեդիտային համակարգի չափորոշիչ նյութերի համապատասխան փաթեթով,

- շարունակվում են գործընթացները ուսումնական ինֆրակառուցվածքի հետագա բարելավման ու արդիականացման, որակյալ դասավանդման մեթոդական, տեխնոլոգիական ռեսուրսների, այդ թվում՝ տեխնոլոգիական կարողությամբ լսարանների ցանցի զարգացման ուղղությամբ, արդեն կահավորվել և շահագործվում են ավելի քան 14 այդպիսի լսարաններ:

Վերը նշվածը չէր ունենա պատշաճ արդյունք և արդյունավետություն, եթե չլիներ համապատասխան և բարձր մասնագիտական կարողություններով օժտված պրոֆեսորադասախոսական կազմ: Այս առումով համալսարանը կարողացել է նվազագույնի հասցնել 1990-ականների սկզբի արտահոսքի հետևանքները և սկսել է կադրային

ներուծի թարմացման ու երիտասարդացման աստիճանական գործընթացը: Համալսարանում այսօր աշխատում են գիտությունների 68 դոկտորներ, 455 թեկնածուներ, ՀՀ ԳԱԱ 5 անդամներ: Համալսարանում գործող մասնագիտական 6 խորհուրդներում յուրաքանչյուր տարի պաշտպանվում են ավելի քան 30 թեկնածուական և դոկտորական ատենախոսություններ: Համալսարանը շարունակում է պատվով կատարել նաև մեկ այլ առաքելություն՝ այն եղել ու մնում է տեխնիկական գիտությունների զարգացման առաջատար կենտրոնը Հայաստանի Հանրապետությունում:

Համալսարանում հաջողությամբ իրականացվում են 45 թեմատիկ, 11 բազային և 2 պետական նպատակային հետազոտական ծրագրեր, իսկ Միջազգային տարբեր հիմնադրամներից ֆինանսավորվող գիտական նախագծերի թվաքանակը կազմում է 11:

Պոլիտեխնիկը հաջողությամբ զարգացնում և բազմազանեցնում է համագործակցությունը արտերկրի բազմաթիվ հայտնի և բարձր վարկանիշ ունեցող կրթական հաստատությունների հետ: Միայն վերջին երկու տարում կնքվել են երկկողմ համագործակցության 21 պայմանագրեր, հաջողությամբ կազմակերպվել ու իրականացվել են կրթական բարեփոխումների հիմնահարցերին նվիրված միջազգային խորհրդաժողովներ:

Այսօր համալսարանի ակտիվ գործընկերների շարքում են՝ Աթենքի տեխնիկական համալսարանը (Հունաստան), Հելլոբունի, Զիգենի, Իլմենաուիի, Շտուտգարդի, Ռոստոկի և Ջենայի համալսարանները (Գերմանիա), Ստոկհոլմի թագավորական տեխնիկական և Լունդի համալսարանները (Շվեդիա), Զլինի Թոմաս Բատայի համալսարանը (Չեխիա), Ճենովայի համալսարանը և Թուրինի պոլիտեխնիկական ինստիտուտը (Իտալիա), Լեհաստանի փաթեթավորման և զարգացման կենտրոնը, Ռեննի կիրառական գիտությունների ազգային համալսարանը, Գրենոբլի համալսարանը (Ֆրանսիա), Սիբիրի համալսարանը (Ռուսիա), Մալթայի համալսարանը, Միդլսեքսի համալսարանը (Անգլիա), Կալիֆոռնիայի պետական համալսարանը, Նորթրիջ, Կալիֆոռնիայի պոլիտեխնիկական համալսարանը, Հ.Սամուելի անվան ճարտարագիտության և կիրառական գիտությունների դպրոցը (ԱՄՆ), Ռուսաստանի Դաշնության և ԱՊՀ մի շարք համալսարաններ:

Այսօր արդեն իսկ կարելի է արձանագրել նաև «Պոլիտեխնիկ» հիմնադրամի հաջող մեկնարկը:

Համառոտակի անդրադառնելով Համալսարանի ապագային և առաջնորդվելով մեր երրորդ ռազմավարական պլանի ուրվագծումներով, կարելի է վստահորեն փաստել, որ համալսարանն ընթանում է կայուն զարգացման ուղիով՝ համահունչ տեղի ունեցող միջավայրային փոփոխություններին ու երևան եկող նոր մարտահրավերներին, և այս առումով բուհի զարգացման ռազմավարական նշանակետերը կամ թիրախները մոտակա հեռանկարում պետք է փնտրել հետևյալում.

1. Մասնագիտական կադրերի և գիտական ներուժի պատրաստման բազմամակարդակ համակարգի զարգացումը նոր կրթական ծրագրերի ձևերի, մեթոդների ներդրման և լաբորատոր ու փորձարարական բազայի արդիականացման հիմքի վրա:
2. Իննտելագիտն-կրթական ծրագրերին աջակցող կազմակերպական-մեթոդական համակարգի ստեղծումը:
3. Ռեսուրսների կենտրոնացումը գերակա կրթա-հետազոտական ծրագրերի ուղղությամբ:

4. Համալսարանի մանկավարժական և գիտական ներուժի զարգացումը հիմնարար և կիրառական հետազոտությունների խորացման հաշվին:
5. Համալսարանի եկամուտների աճի ապահովումը կրթական և իննովացիոն գործունեության շրջանակների ընդլայնման ճանապարհով, այդ թվում՝ կադրերի նպատակային պատրաստում, տեխնոլոգիաների տրանսֆերտ, խորհրդատվական ծառայությունների մատուցում, հեռահար ուսուցում և այլն:
6. Ռազմավարական գործընկերների հետ երկարաժամկետ կապերի խորացում, փոխօգնության ձևերի և մեթոդների զարգացում:
7. Բուհի կառավարման համակարգի կատարելագործում:

Հայաստանի պետական ճարտարագիտական համալսարանը ունի իր առանձնակի տեղն ու դերակատարությունը մեր պետության և հասարակության կյանքում: Պոլիտեխնիկցին միշտ էլ աչքի է ընկել ոչ միայն իր բարձր մասնագիտական պատրաստականությամբ, այլև հայրենասիրությամբ, լայն մտահորիզոնով, պատասխանատու որոշումներ ընդունելու յուրօրինակ ձիրքով և արագ կողմնորոշվելու ունակությամբ: Պոլիտեխնիկականի ծնունդ պետական-քաղաքական գործիչների մի ամբողջ փաղանգ է նվիրվածությամբ, պատվով ծառայել ու շարունակում է ծառայել մեր ժողովրդին ու մեր պետությանը:

Հայոց անկախ պետականության կերտման ներկա ոչ դյուրին փուլում ևս պոլիտեխնիկցիներն ունեն ծանրակշիռ ասելիք ու անելիք, որը, ինչպես միշտ, մեզանից պահանջում և պահանջելու են ամենայն բժախնդրությամբ, քանզի մենք ներկայացնում ենք ունակ, կարող ու հզոր ուժ:

О.И. ДРАЧЕВ, Г.В. ТАРАНЕНКО, В.А. ТАРАНЕНКО, А. СВИЦЬ

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВИБРАЦИОННОГО СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ

Приводится модель динамической системы (ДС) вибрационного сверления отверстий и рассматривается алгоритм настройки параметров этой системы. Дается анализ влияния колебаний формообразующей системы на эффективность обработки, а также анализ высокочастотных смещений режущей части инструмента на основе разработанной математической модели и структурной схемы объекта управления с касательным контуром. Определены области устойчивости нелинейной системы и приводится сравнительный анализ полученных экспериментальных и расчетных данных.

Ключевые слова: алгоритм, параметр, вибрационное сверление, модель, колебания, область устойчивости, нестационарная система.

Алгоритм настройки параметров динамической системы вибрационного сверления отверстий. При сверлении глубоких отверстий из-за радиальной составляющей силы резания наблюдается увод оси просверленного отверстия, а также его разбивка в поперечном сечении. При этом точностные параметры и микрорельеф обработанной поверхности по всей длине отверстия определяются формой, амплитудой и частотой колебаний подсистемы инструмента, которая является доминирующей колебательной системой. Стабилизация точностных параметров и параметров качества поверхности обеспечивается настройкой соответствующих параметров колебательной системы. Настройка параметров ДС вибрационного сверления отверстий с использованием автоколебаний (сверление отверстий с использованием волноводного преобразователя (ВП)) [1] может осуществляться по двум каналам: а) управление вылетом инструмента, обеспечивающее изменение жесткостных характеристик инструмента и, следовательно, собственных частот подсистемы инструмента; б) управление скоростью резания, обеспечивающее требуемую амплитуду возникающих крутильно-продольных автоколебаний.

Для повышения эффективности сверления отверстий с использованием ВП необходимо решить следующие задачи. Во-первых, для обеспечения точности обработанного отверстия форма генерируемых колебаний в зоне резания должна быть преимущественно крутильной, поскольку, как показали эксперименты [2], наличие крутильных колебаний инструмента приводит к уменьшению поперечных колебаний; во-вторых, для повышения производительности форма колебаний должна быть продольной, так как в этом случае обеспечивается устойчивое дробление и отвод стружки. Причем параметры этих колебаний (частота и амплитуда) зависят как от режимов обработки (подачи и скорости), так и от динамических характеристик подсистемы инструмента (жесткости, которая в первую очередь определяется вылетом инструмента). Соотношение продольной и крутильной компонент зависит от частоты возбуждения и собственной

частоты подсистемы инструмента. В случае автоколебательного движения формы колебаний подсистемы являются определенными для каждой собственной частоты. Но появление автоколебательного движения возможно лишь при определенных сочетаниях параметров процесса обработки и ДС.

Цель настройки заключается в обеспечении определенной формы колебаний (соотношения продольной и крутильной составляющих) и их параметров – частоты и амплитуды. Направление колебаний должно совпадать с винтовой линией относительного движения инструмента и заготовки в процессе безвибрационного сверления, шаг которой равен подаче инструмента на оборот детали. Из условия обеспечения колебаний в направлении резания оптимальное соотношение амплитуд определяется выражением $A_x / A_\varphi = f_{o.wz} / 2\pi$, где A_x , A_φ – амплитуды продольных и крутильных колебаний соответственно; $f_{o.wz}$ – осевая подача инструмента.

Способ настройки заключается в обеспечении постоянства соотношения частоты крутильно-продольных колебаний среднечастотного диапазона и частоты стружкообразования, которая определяется предварительным расчетом. Параметры колебаний задаются характеристиками упругой подсистемы инструмент-волновод (собственной частотой инструмента) и процесса резания.

Ограничивающими факторами при настройке ДС сверления отверстий являются стойкость инструмента и производительность обработки. Критерием согласования частот является минимум статической составляющей – угла закручивания подсистемы инструмент-волновод. Поднастройка может осуществляться в промежутке между выполняемыми переходами, а также в процессе сверления при использовании системы автоматического управления. И в том, и в другом случаях диагностируются параметры возникающих колебаний инструмента при помощи токовых датчиков.

Анализ влияния параметров колебаний формообразующей системы на эффективность обработки. Проанализируем влияние продольно-крутильных колебаний на изменение поперечной составляющей силы резания, действующей на режущую часть сверла. Осуществление вибрационной обработки при отсутствии внешних источников вибраций возможно за счет устойчивого генерирования автоколебаний с заданной амплитудой, обеспечивающей сохранение стойкости инструмента. Для этого необходимо знать совокупность параметров обработки, при которых наблюдается автоколебательный режим работы ДС.

Для первого приближения используется линейная модель системы, что соответствует колебаниям без отрыва сверла от зоны резания. Анализ проводим только для одного направления без учета крутильного контура, поскольку с использованием ВП возбуждение продольных автоколебаний взаимно связано с возбуждением крутильных колебаний, а построение областей устойчивости для многопараметрической системы будет существенно затруднено. Исследование устойчивости позволяет определить такие предельные сочетания параметров процесса резания – скорости резания, подачи и параметров системы (жесткость и масса), при которых в системе возникают автоколебания. В дальнейшем анализ устойчивости целесообразно проводить с учетом резания “по следу” [3] и отрыва инструмента от поверхности резания, поскольку

продольная компонента колебаний, особенно для целей стружкодробления, может превышать величину подачи (прерывистое резание).

Рассмотрим ДС как одномассовую (рис.1), поскольку колебания преимущественно определяются упругими свойствами подсистемы инструмента с ВП. Представим силу резания в виде

$$F_p(t) = F_{st} + F \sin \omega t, \quad (1)$$

где F_{st} - статическая составляющая силы резания, H ; F - амплитуда переменной силы резания, H ; ω - круговая частота колебаний сверла в радиальном направлении, $рад/с$.

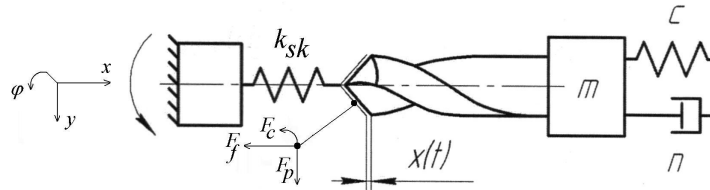


Рис. 1. Одномассовая динамическая модель процесса сверления

Для сил резания, действующих в поперечном направлении, можно записать следующее уравнение движения:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + \beta \frac{dy}{dt} + ky = F_{st} + F \sin \omega t, \quad \text{где } m, \beta, k -$$

соответственно масса, коэффициент вязкого демпфирования, коэффициент жесткости технологической системы в радиальном направлении; y - радиальное смещение.

Расчетная схема рассматриваемой системы приведена на рис.1, где m - приведенная масса сверлильной головки; C - жесткость сверлильной головки в осевом направлении; n - коэффициент демпфирования осевых колебаний; k_{sk} - коэффициент жесткости резания; X - осевое отклонение сверла от положения равновесия; $F_f(t)$ - отклонение осевой силы резания от среднего значения.

Проанализируем влияние колебаний на смещение инструмента в поперечном направлении. Перемещение y определяется из выражения

$$y = \frac{F_{st}}{k} + \frac{F}{k} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 / \omega_n^2)^2 + 4\nu^2 (\omega^2 / \omega_n^2)}} \sin(\omega t - \varphi), \quad \text{где } \operatorname{tg} \varphi = \frac{2\nu(\omega^2 / \omega_n^2)}{1 - (\omega^2 / \omega_n^2)}, \quad \omega_n - \text{круговая}$$

частота собственных колебаний инструмента в радиальном направлении, $рад/с$; $\nu = \beta / \beta_k$, β_k - критический коэффициент вязкого демпфирования; φ - фазовый угол между силой резания и смещением y .

При $\omega / \omega_n \gg 1$ вторым слагаемым в выражении (1) можно пренебречь, и останется только первое слагаемое: $y = F_p / k$. Таким образом, перемещение сверла будет чисто статическим, а его динамические перемещения прекратятся. В случае, когда амплитуда продольных колебаний больше половины величины подачи $A > f_{wz} / 2$, на заготовку действуют импульсные силы сжатия. В случае $A < f_{wz} / 2$ постоянная статическая нагрузка сжимает заготовку и сверло, на которое наложена изменяющаяся по гармоническому закону нагрузка. В момент врезания в обоих случаях силы являются

импульсными. Пусть действующая на сверло радиальная сила резания изменяется по импульсному закону:

$$F_p(t) = \frac{t_s F_{st}}{T} + \frac{2}{\pi} F \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{t_s}{T} n \pi\right) \cos n \omega t,$$

где T - период колебаний; t_s - продолжительность силового импульса.

Если сила резания изменяется по такому закону и удовлетворяется условие $\omega / \omega_n \gg 1$, то перемещение по оси y можно представить в виде $y = t_s F_{st} / Tk$.

Следовательно, фиктивный коэффициент жесткости в T/t_s раз (в среднем 3...10 раз) больше, чем при обработке по традиционной технологии, то есть можно рассматривать это как фиктивное повышение жесткости инструмента. В результате обеспечивается меньший увод инструмента и разбивка отверстия [4].

На процесс резания влияет соотношение собственных частот и частот стружкообразования. При сдвиге элементов стружки происходят релаксационные колебания элементов ДС. Так как интенсивность этих процессов небольшая, то данные колебания не могут существенно сказаться на механизме стружкообразования, силе резания. Но при близости собственных частот к ним (в том числе высших гармоник) может произойти эффект самосинхронизации автоколебаний и процесса стружкообразования с интенсификацией сдвиговых процессов, уменьшением силы резания и повышением точности. Если вводить ДС в антирезонанс, то есть максимально отстраивать собственные частоты от частот стружкообразования, то стойкость инструмента будет максимальной.

В основном, автоколебания происходят с периодическим изменением амплитуды, и, следовательно, они схожи по форме с формой биений из-за наложения внешних периодических сил, кратных частоте вращения заготовки.

Главную окружную силу резания F_C при условии, что рассматривается установившийся процесс обработки, минуя моменты входа и выхода инструмента из зоны обработки, можно представить во времени следующим образом:

$$F_C(t) = F_{Cst} + F_{CS}(t), \quad (2)$$

где F_{Cst} - статическая сила, определяемая теоретически, исходя из геометрии инструмента; $F_{CS}(t)$ - приращение во времени амплитуды статической силы, стохастическая нестационарная величина, зависящая от многих факторов, в том числе от изменения приращения толщины срезаемого (деформируемого) материала с течением времени.

Значение приращения амплитуды статической силы резания $F_{CS}(t)$ можно представить как функцию ψ от изменения приращения толщины срезаемого (деформируемого) материала с течением времени:

$$F_{CS}(t) = \psi \left[e \sin\left(\frac{2\pi n_w}{60} t\right) - y(t - \tau) + y(t - \tau - T_0) \right], \quad \text{где } e - \text{ несимметричность заточки}$$

инструмента, m ; n_w - частота вращения шпинделя, мин^{-1} (в реальных условиях привод вращения заготовки обладает достаточным запасом мощности и крутильной жесткостью, что позволяет считать частоту вращения шпинделя постоянной); y - изменение во

времени приращения толщины срезаемого материала по оси Y , m ; τ - отставание по времени силы от изменения толщины срезаемого (деформируемого) материала, происходящее из-за инерционности процесса резания, c ; T_0 - время одного оборота детали, учитывающее запаздывание при работе “по следу” и равное $60/(n_w \cdot z)$; z - число режущих кромок при постоянном их шаге, для сверления $z = 2$, c .

В условиях, близких к идеальным (постоянная толщина срезаемого материала и отсутствие погрешности заточки), $F_{cS}(t)$ точно описывается выражением

$$F_{cst}(t) = dF_{cst} \cdot \sin(2\pi f_s t), \quad (3)$$

где d - доля статической силы резания, приходящаяся на ее стохастическое изменение во времени; f_s - частота, соответствующая частоте периодических сдвиговых процессов при стружкообразовании, $Гц$.

Один период включает два временных интервала: на первом происходит возрастание нагрузки, при которой деформация обрабатываемого материала в зоне резания носит упругий характер, на втором – ее уменьшение в связи с разрушением обрабатываемого материала, когда происходит пластическая деформация сдвига. Интервал времени, соответствующий пластическому сдвигу, составляет примерно половину периода. Подставляя выражение (3) в (2), получим

$$F_c(t) = F_c[1 + d \sin(2\pi f_s t)].$$

При анализе последнего выражения становится очевидным, что $F_c(t)$ будет средней величиной силы обработки. При лезвийной обработке изменение силы от минимального значения до максимального будет характеризовать упругую деформацию, а от максимального значения до минимального – пластическую деформацию.

Таким образом, даже при идеальных условиях обработки автоколебания всегда будут иметь место. Они отсутствуют только при условии $F_c(t) = const$, которое физически неосуществимо. Поэтому применительно к автоколебаниям нельзя говорить об их нивелировании, можно лишь управлять амплитудой и частотой колебаний, изменяя условия обработки. В реальных же условиях изменение во времени приращения толщины срезаемого материала в каждый конкретный момент времени различно, и это обуславливает изменение амплитуды и частоты силы, следовательно, амплитуды и частоты вибраций в широком диапазоне.

Автоколебания существенно влияют на формирование погрешности формы обрабатываемой детали, параметры шероховатости и волнистости, а также износ инструмента. Шаг вибрационной волны, оставленной на поверхности детали в поперечном направлении, равен $L_v = 1000v_c / (60 f_w)$, где v_c - скорость резания, $m/мин$; f_w - частота вибраций (автоколебаний) инструмента, $Гц$.

Шаг вибрационной волны в продольном направлении $L_{f_{wz}}$ теоретически равен продольной подаче на один оборот детали. Высота вибрационных волн зависит от амплитуды колебаний инструмента. Частоту вибраций инструмента f_w необходимо определить по нормали к обрабатываемой поверхности, так как именно в этом

направлении относительное смещение инструмента и обрабатываемой детали приводит к возникновению погрешностей формы деталей.

Для сверления справедливы следующие формулировки:

- при низких скоростях обработки и высоких частотах вибраций колебания инструмента влияют на профиль микронеровностей поверхности;
- при средних скоростях обработки и средних частотах вибраций колебания инструмента приводят к возникновению волнистости;
- при высоких скоростях обработки и низких частотах вибраций колебания инструмента приводят к возникновению погрешностей формы детали;
- при совпадении значений частот вращения заготовки и автоколебаний инструмента погрешности формы детали не возникнут, зато поверхность получится эксцентричной по отношению к оси технологической базы;
- если частота автоколебаний инструмента в 2 раза больше частоты вращения заготовки, возникает овальность в поперечном сечении детали, если в 3 раза больше – возникает огранка с трехвершинным профилем и т. д. При этом дробная часть отношения частот вращения заготовки и автоколебаний инструмента будет характеризовать наклон волн относительно оси детали.

Определив частоту колебаний инструмента при обработке, можно однозначно сказать, возникает ли волнистость или погрешность формы детали, то есть частоту автоколебаний можно использовать для контроля и как критерий управления при создании систем адаптивного управления, поскольку, управляя частотой и амплитудой автоколебаний, управляем получаемыми параметрами качества обрабатываемой детали.

Значения среднего арифметического отклонения профилей шероховатости и волнистости с увеличением частоты автоколебаний инструмента при постоянной их амплитуде будут уменьшаться, а с увеличением амплитуды автоколебаний инструмента при их постоянной частоте – увеличиваться при прочих одинаковых условиях обработки. Увеличение частоты колебаний инструмента, с одной стороны, приводит к уменьшению погрешностей формы детали, с другой стороны – высокие частоты колебаний инструмента способствуют его интенсивному разрушению (изнашиванию), так как увеличивается число микроударов инструмента о поверхность детали в единицу времени при переменной нагрузке (силе резания).

Автоколебания до определенных значений амплитуд способствуют пластической деформации обрабатываемого материала, уменьшению коэффициента трения материала по поверхности инструмента и, следовательно, снижению нагрузки при обработке и увеличению стойкости инструмента. Дальнейшее увеличение амплитуды автоколебаний приводит к усталостному разрушению рабочей части инструмента. Следовательно, зависимость стойкости инструмента от амплитуды колебаний (при фиксированной частоте) носит экстремальный характер и экстремум этой зависимости соответствует наименьшему износу инструмента (наибольшей стойкости).

Таким образом, необходимо определить оптимальную частоту и амплитуду колебаний инструмента для обеспечения заданных параметров качества обработанной детали при наименьшем износе инструмента. Изменение амплитуды колебаний инструмента в большей степени влияет на стойкость инструмента, среднее

арифметическое отклонение профилей шероховатости и волнистости, чем изменение частоты колебаний. Зависимости среднего арифметического отклонения профилей шероховатости и волнистости от амплитуды и частоты колебаний инструмента носят почти линейный характер.

Износ инструмента можно оценить по вибросигналу, поступающему из зоны обработки (с пьезокерамических акселерометров, установленных на ВП). Автоколебания во времени изменяют свою частоту и амплитуду, что, помимо факторов, указанных выше, связано еще и с износом инструмента. Следовательно, для оценки износа инструмента необходимо определить соответствующий диапазон частоты автоколебаний.

Трем стадиям износа инструмента будут соответствовать три различные полосы частоты вибросигнала. При приработке инструмента износ будет влиять на параметры шероховатости. Следовательно, первую стадию износа необходимо определять по вибрациям высокой частоты. На стадии нормального изнашивания износ инструмента будет влиять уже не только на шероховатость, но и на волнистость поверхности, следовательно, вторую стадию износа необходимо определять по вибрациям средней и, дополнительно, высокой частот. При приближении к стадии катастрофического изнашивания износ инструмента будет влиять на погрешности формы детали, следовательно, износ в этом случае необходимо определять по низкочастотным вибрациям. Таким образом, автоколебания отражают состояние ДС и по параметрам вибросигнала можно судить о получаемых параметрах шероховатости и волнистости.

Анализ высокочастотных смещений режущей части инструмента. В общем случае сила резания выражается в векторной форме:

$$\bar{F} + (T_{sk})F' = (k_{sk})\Delta\bar{r} + (h_{sk})\Delta\bar{r}',$$

где $\bar{F} = \bar{F}_f + \bar{F}_p + \bar{F}_c$; $\Delta\bar{r} = \bar{a} + \bar{b} + \bar{c}$ - вектор функции силы резания и смещений соответственно; (T_{sk}) - матрица постоянных времени стружкообразования; (k_{sk}) - матрица коэффициентов резания; (h_{sk}) - матрица коэффициентов демпфирования.

Постоянные времени резания в диапазоне скоростей 50...100 м/мин находятся в соотношении $T_{Fc} < T_{Fp}$ [3,5]. Если принять допущения, что постоянные времени демпфирования по разным координатам равны друг другу, пропорциональны соответствующим коэффициентам резания и толщина срезаемого слоя на порядок меньше его ширины, то обобщенная характеристика силы резания будет иметь вид

$$F + T_{sk}F' = k_{sk}\omega + h_{sk}\omega' + h'_{Fc}.$$

Высокочастотная переменная составляющая силы резания обусловлена автоколебаниями в продольно-крутильном направлении, что соответствует среднечастотной области колебаний, и ей должна быть кратна частота сдвиговых процессов зоны стружкообразования (определенному числу циклов колебаний инструмента соответствует ступенька сдвига на обратной стороне стружки). Колебательная скорость определяется силами трения, которые являются функцией стационарной скорости резания. В условиях управления скоростью резания отклонение от средней скорости незначительное, а так как обработка ведется в диапазоне падающей

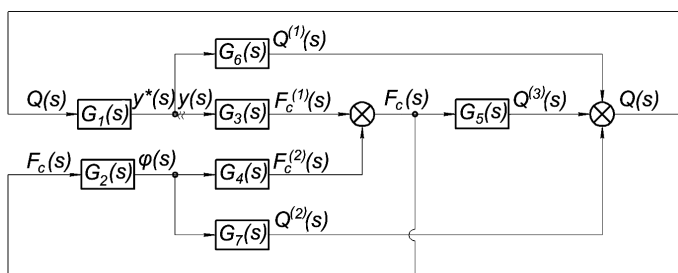
Взаимосвязь поперечных и комплексных колебаний инструмента при сверлении в соответствии с рекомендациями [6] можно анализировать, оставляя для упрощения только крутильную компоненту. В данном случае система нелинейных уравнений, описывающих поведение системы при запаздывании силы от смещений, имеет вид

$$\begin{cases} T_{1Y}^2 \ddot{y} + T_{2Y} \dot{y} + y = Q, & T_{3Z}^2 \ddot{\phi} + T_{4z} \dot{\phi} + \phi = F_c, \\ T_{F_c} F_c + F = k_y y - h_{z1} \dot{\phi}, & T_{F_p} \dot{Q} + Q = -h_y \dot{y} - h_{z2} \dot{\phi} + F_c, \end{cases}$$

Отсюда можно получить следующие выражения передаточных функций:

$$\begin{aligned} G_1(s) &= y(s)/Q(s) = 1/(T_{1Y}^2 s^2 + T_{2Y}s + 1), \quad G_2(s) = \varphi(s)/F_c(s) = 1/(T_{3Z}^2 s^2 + T_{4Z}s + 1), \\ G_3(s) &= F_c(s)/y(s) = k_Y/(T_{FZ}s + 1), \quad G_4(s) = F_c(s)/\varphi(s) = h_{Z1}s/(T_{FZ} + 1), \\ G_5(s) &= Q(s)/F_c(s) = 1/(T_{FY}s + 1), \quad G_6(s) = Q(s)/y(s) = h_Y s/(T_{FY}s + 1), \\ G_7(s) &= Q(s)/\varphi(s) = h_{Z2}s/(T_{FY} + 1) \end{aligned} \quad (4)$$

На основании передаточных функций (4) и структурной схемы (рис.2) были получены АФЧХ (рис.3). При малых возмущениях касательные колебания пренебрежимо мало влияют на толщину среза, не вызывая непосредственно запаздывания и изменения сил резания и трения. Контур крутильных колебаний, не раскачивая систему, поглощает энергию при возмущении силы F_C . Поскольку, как отмечалось выше, постоянная времени стружкообразования для F_C меньше, чем для F_P , то колебания будут рассеиваться в касательном контуре без поперечных смещений инструмента. В связи с этим следует, что, по сравнению с амплитудой нормальных смещений y , увеличение амплитуды комплексных смещений выгодно, так как это способствует уменьшению энергии колебаний контура y и повышает виброустойчивость системы.



366

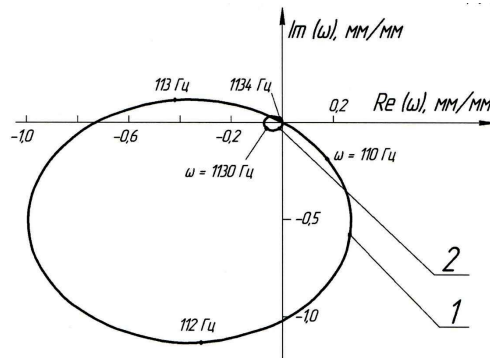


Рис. 3. АФЧХ системы для передаточной функции $G(s) = y^*(s)/y(s)$: 1 – без касательного контура, 2 – с касательным контуром

Анализ динамической системы вибрационного сверления как нестационарной системы. Рассматривается методика определения динамической характеристики резания при сверлении и дается анализ устойчивости подсистемы “процесс резания – сверлильная головка”. Для первого приближения используется линейная модель системы, что соответствует колебаниям без отрыва сверла от зоны резания. Расчетная схема такой системы приведена на рис.1. Система уравнений, описывающих зависимость силы резания от колебаний и продольных смещений от силы резания, на основании замкнутости системы имеет вид $m \frac{d^2 x}{dt^2} + n \frac{dx}{dt} + Cx = F_f(t)$, $T_{sk} \frac{dF_f(t)}{dt} + F_f(t) = -k_{sk} x$, где $k_{sk} = a_p k$ – жесткость резания; $k = \sigma_0 \xi$ – удельная сила резания; σ_0 – предел прочности; $T_{sk} = a \xi m / (n v_c)$ – постоянная времени стружкообразования; ξ – коэффициент усадки стружки; $a_p = f_{wz} \sin \kappa$ – толщина срезаемого слоя.

Передаточные функции упругой системы и процесса резания будут соответственно

$$G_1(s) = x(s)/F_f(s) = 1/(ms^2 + ns + C), G_2(s) = F_f(s)/x(s) = k_{sk}/(T_{sk} \cdot s + 1).$$

Динамическая система считается устойчивой, если корни знаменателя передаточной функции будут находиться в левой полуплоскости S , в которой вещественная часть отрицательна. Таким образом, подвергнуты анализу корни полинома:

$$(m \cdot s^2 + n \cdot s + C)(T_{sk} \cdot s + 1) = T_{sk} \cdot m \cdot s + (T_{sk} \cdot n + m) \cdot s^2 + (T_{sk} \cdot C + n) \cdot s + C + k_{sk} \cdot$$

Для анализа корней полинома воспользуемся критерием Гурвица и введем дополнительные обозначения [2]:

$$T_{sk} m = A_0, T_{sk} n + m = A_1, T_{sk} C + n = A_2, C + k_{sk} = A_3.$$

Все корни полинома будут в левой полуплоскости при соблюдении условия

$$A_1 A_2 - A_0 A_3 > 0. \quad (5)$$

Из условия (5) находим уравнение границы устойчивости:

$$T_{sk} = \left(-(n - mk_{sk}) \pm \sqrt{(n - mk_{sk})^2 - 4mn^2C} \right) / (2nC).$$

Данное уравнение выражает связь между режимами резания и параметрами системы на границе устойчивости.

Определение устойчивости нелинейной системы. Для систем с трансцендентными звеньями условия устойчивости замкнутых систем записываются в виде [6]

$$H(\omega) = 1, \quad \theta(\omega) = -57,3\tau\omega - 2\pi\nu, \quad (6)$$

где $H(\omega)$ - амплитудно-частотная характеристика; $\theta(\omega)$ - фазочастотная характеристика; ν принимает численное значение в зависимости от величины периода трансцендентной функции.

Из первого уравнения (6) определяется частота, при которой характеристика $G(j\omega)$ пересекает окружность с радиусом, равным единице (на частоте среза $\omega_{sr} = \omega_{kr}$). Из второго уравнения (6) находится значение времени τ , разделяющее плоскость на области устойчивости и неустойчивости по этому параметру (τ_{kr}):

$$\tau_{kr} = \theta(\omega_{kr}) / \omega_{kr} + 2\pi\nu / \omega_{kr}.$$

Для звена чистого запаздывания период функции будет равен 2π , и ν примет значения неотрицательных натуральных чисел 0, 1, 2... . Если устойчивость нелинейных систем анализируется методом гармонической линеаризации, предварительно проверяется свойство обобщенного фильтра для линейной части:

$$|G_L(jk\omega)| \ll |G_L(j\omega)|, \text{ где } k = 2, 3, \dots$$

Нелинейная система приводится к виду, при котором условие устойчивости записывается как $L(j\omega) = 1 + G(j\omega)J(A) = 0$, откуда $L(j\omega, A) = X(\omega, A) + jY(\omega, A)$.

Из представленных на рис.4а и б зависимостей следует, что теоретические и экспериментальные границы устойчивости соответствуют друг другу. Тот факт, что частоты, доминирующие при обработке, соответствуют собственным частотам крутильных колебаний, которые отсутствуют при изгибных, виден из спектрограмм затухающих колебаний по соответствующим координатам (рис. 5а и б).

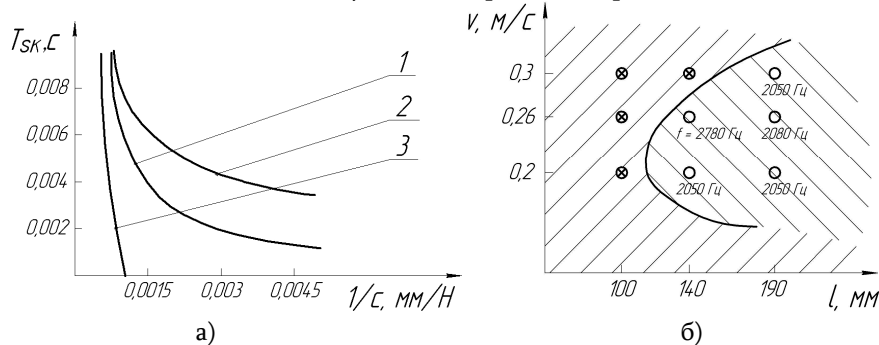
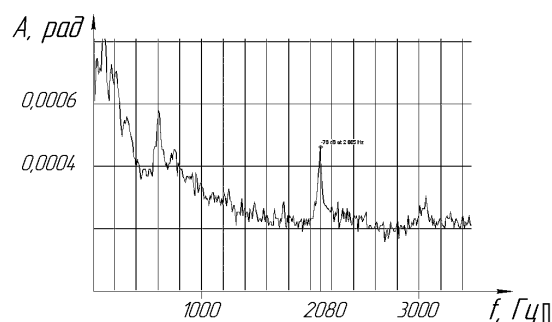


Рис. 4. Границы областей устойчивости:

а- для ДС “сверлильная головка – заготовка”: 1 – для линейной системы, 2 – для системы с запаздыванием, 3 – для системы с прерывистым резанием; б- область устойчивости, полученная экспериментально: $\otimes$ - не наблюдалось крутильных автоколебаний, $\circ$ - наблюдались интенсивные крутильные автоколебания, $\blacksquare$ - экспериментальная граница устойчивости

Из-за изменения параметров резания и технологической системы обработка протекает с переменными динамическими характеристиками (частотой и амплитудой колебаний). Это приводит к изменяющимся по длине обработки параметрам поверхности (волнистости, шероховатости) и увеличению отклонений геометрической формы от цилиндричности, круглости.



а)

б)

Рис. 5. Спектрограммы: а-затухающих крутильных колебаний; б-затухающих изгибных колебаний

На основе анализа математических моделей динамической системы сверления были определены области устойчивости в зависимости от технологических и конструктивных факторов (режимов резания, жесткости и демпфирования).

Заключение. Разработана математическая модель технологической системы для сверления отверстий с учетом резания по следу и прерывистости процесса обработки. Выполнен анализ влияния крутильных колебаний инструментальной подсистемы и их параметров на поперечные смещения и точность обработки; выявлено, что при наличии крутильных колебаний амплитуда поперечных колебаний снижается в 12...15 раз. Теоретически определены области существования устойчивых колебаний инструментальной подсистемы с помощью анализа на устойчивость упрощенной модели технологической системы по критерию Гурвица.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zubrzycki J., Drachov O., Taranenko V., Taranenko G.** The device to processing of the deep holes// Acta Mechanica Slovaca: Journal published by Faculty of Mechanical Engineering, the Technical University in Kosice.- Kosice, 2-A/2008, Ročník 12.
2. **Кумабэ Д.** Вибрационное резание: Пер. с япон. С. Л. Масленникова / Под ред. И.И. Портнова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
3. **Кудинов В. А.** Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
4. **Taranenko G., Taranenko V., Szabelski J., Swic A.** Systemic analysis of models of dynamic systems of shaft machining in elastic-deformable condition // Applied Computer Science. Business Process Optimization / Technical University of Žilina. - Slovenska Republika. -2007. – V. 3, No 2. - S. 115 – 138.

5. **Эльясберг М. Е.** Основы теории автоколебаний при резании металлов // Станки и инструмент. – 1962. - №10. – С. 3 – 8; №11. – С. 3 – 6.
6. **Бессековский В.Г.** Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1972. – 768 с.

Тольяттинский технический университет, Севастопольский национальный технический университет, Люблинский технический университет. Материал поступил в редакцию 11.01.2008

Օ.Ի. ԴՐԱՉԵՎ, Գ.Վ.ՏԱՐԱՆԵՆԿՈ, Վ.Ա. ՏԱՐԱՆԵՆԿՈ, Ա.ՍՎԻՑ

ԹՈՒՐԱԳԱՅԼԻԿՈՆՄԱՍԲ ԱՆՑՔԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ ԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅԱՆ ՀԻՄՆԱՎՈՐՈՒՄ

Բերված է անցքերի թրթռագայլիկոնմանը դինամիկական համակարգի մոդելը, վերջինիս պարամետրերի լարման ալգորիթմը և մշակման արդյունավետության վրա համակարգի տատանումների ազդեցության վերլուծությունը: Մշակված մաթեմատիկական մոդելի և շոշափող կոնտուրով օբյեկտի կառավարման կառուցվածքային սխեմայի հիման վրա ներկայացված է գործիքի կտրող մասի բարձր հաճախության շեղումների վերլուծությունը: Որոշված է ոչ գծային համակարգի կայունության տիրույթը, ներկայացված է փորձարարական ու հաշվարկային տվյալների համեմատական վերլուծությունը:

Առանցքային բառեր. ալգորիթմ, պարամետր, թրթռագայլիկոնում, տատանումների մոդել, կայունության տիրույթ, ոչ ստացիոնար համակարգ:

O.I. DRACHOV, G.V. TARANENKO, W.A. TARANENKO, A. SWIC

SUBSTANTIATION OF DYNAMIC SYSTEM PARAMETERS CHOICE OF APERTURE VIBRATING DRILLING

The model of apertures vibrating drilling dynamic system, algorithm of this system parameter adjustment and the analysis of fluctuations influence on efficiency are shown. The analysis of high-frequency displacement of a cutting part of the tool on the basis of the developed mathematical model and the block diagram of management object with a tangent contour is presented. Areas of nonlinear stability system are defined and the comparative analysis of the experimental and settlement data obtained are carried out.

Keywords: algorithm, parameter, vibrating drilling, model, fluctuations, stability area, non-stationary system.

А.М. АРЗУМАНЯН

К МЕТОДУ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В РЕЖУЩЕЙ ПЛАСТИНЕ И ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ

Рассмотрены дифференциальные уравнения теплопередачи при исследовании процесса температурных полей режущего инструмента и обрабатываемого материала в случае тонкой прерывистой обработки цветных металлов и сплавов. Дифференциальные уравнения теплопроводности совместно с начальными и граничными условиями решаются численным методом. Заменяя дифференциальные операторы уравнений теплопроводности разностными операторами и решая разностные уравнения теплопроводности, можно определить температуры в любых точках режущей пластины и обработанной детали в любой момент времени.

Ключевые слова: дифференциальное уравнение, температурное поле, режущая пластина, цветные металлы, математическая модель.

Обеспечение высокого качества деталей из цветных металлов и сплавов, точность размеров и высокая производительность являются актуальной задачей обработки материалов резанием, для которых требуется изучение температурных полей как в режущей пластине, так и в обрабатываемой детали.

Поверхностный слой обрабатываемого материала при тонкой прерывистой обработке цветных металлов и сплавов находится под воздействием внешних сил и температур, изменяющихся достаточно быстро во времени. Влияние того или иного фактора зависит от режимов и условий обработки.

Математическая модель процесса теплопередачи для каждого элемента пары инструмент–деталь основана на обобщенном законе сохранения энергии [1].

В качестве режущего инструмента применяется однозубая фреза, оснащенная пластинкой из синтетического корунда, а в качестве обрабатываемой детали – заготовка из цветных металлов. Однозубая фреза совершает вращательное движение с угловой скоростью ω , а также движение подачи, а обрабатываемая деталь неподвижна. На рисунке показана схема обработки и расположения осей для расчета локальных температур в режущей пластине и обрабатываемой детали.

В основу расчета температурных полей в режущей пластине и обрабатываемой детали положено дифференциальное уравнение теплопроводности [2]:

- для режущей пластины:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_p}{\partial \tau} = \frac{\lambda_p}{c_p \rho_p} \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial x_p^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y_p^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial z_p^2} \right) + \\ + \omega_p \cdot R \left(\frac{\partial T_p}{\partial x_p} + \frac{\partial T_p}{\partial y_p} + \frac{\partial T_p}{\partial z_p} \right) + \frac{1}{c_p \rho_p} Q_p; \end{aligned} \quad (1)$$

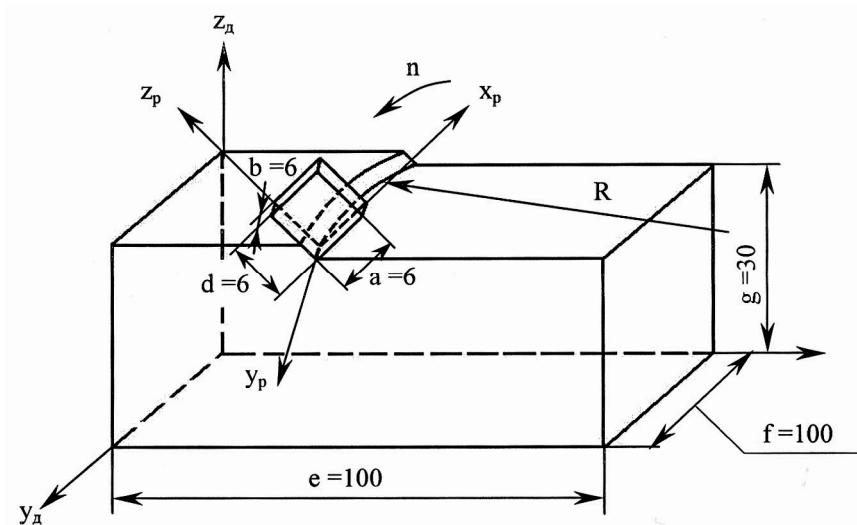


Рис. Схема обработки заготовки из цветного металла режущей пластиной из синтетического корунда и расположения осей для расчета температурных полей

- для обрабатываемой детали:

$$\frac{\partial T_d}{\partial \tau} = \frac{\lambda_d}{c_d \rho_d} \left(\frac{\partial^2 T_d}{\partial x_d^2} + \frac{\partial^2 T_d}{\partial y_d^2} + \frac{\partial^2 T_d}{\partial z_d^2} \right) + \frac{1}{c_d \rho_d} Q_d. \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) приняты следующие индексы и обозначения: p – режущая пластина; d – обрабатываемая деталь; λ – коэффициент теплопроводности, Дж/кг(К) ; ρ – плотность, кг/м^3 ; ω_p – угловая скорость вращения режущей пластины (угловая скорость перемещения источника теплоты), рад/с ; τ – время, с ; x, y, z – декартовы координаты, м ; R – радиус фрезерования, м ; Q – мощность источника теплоты, Вт.м^3 ; T – температура, К .

Дифференциальные уравнения теплопроводности решаются при следующих начальных и граничных условиях.

Начальное условие:

при $\tau = 0$, $T_p = T_d = T_o$, где T_o – температура окружающей среды, К ($T_o = 293 \text{ К}$).

Граничные условия:

для режущей пластины: $0 \leq x_p \leq a$, $0 \leq y_p \leq b$, $0 \leq z_p \leq d$,

$$\frac{\partial T_p(a, y_p, z_p, \tau)}{\partial x_p} = -\alpha_1 [T_p(a, y_p, z_p, \tau) - T_o], \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_p(b, x_p, z_p, \tau)}{\partial y_p} = -\alpha_1 [T_p(b, x_p, z_p, \tau) - T_o], \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_p(d, x_p, y_p, \tau)}{\partial z_p} = -\alpha_1 [T_p(d, x_p, y_p, \tau) - T_o], \quad (5)$$

где α_1 - коэффициент теплоотдачи от поверхностей режущей пластины к окружающей среде, $Вт/м^2К$ (вынужденная конвекция); a, b, d - линейные размеры режущей пластины, $м$,

- для обрабатываемой детали:

$$\frac{\partial T_d(e, y_d, z_d, \tau)}{\partial x_d} = -\alpha_2 [T_d(e, y_d, z_d, \tau) - T_o], \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_d(f, x_d, z_d, \tau)}{\partial y_d} = -\alpha_2 [T_d(f, x_d, z_d, \tau) - T_o], \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_d(g, x_d, y_d, \tau)}{\partial z_d} = -\alpha_2 [T_d(g, x_d, y_d, \tau) - T_o], \quad (8)$$

где α_2 - коэффициент теплоотдачи от поверхностей обрабатываемой детали в окружающую среду, $Вт/м^2К$ (свободная конвекция); e, f, g - линейные размеры обрабатываемой детали, $м$.

Условие контакта на первом снимаемом с детали слое:

$$T_d(x_d, y_d)_{z=(g-n\Delta t)} = T_p(y_p)_{x_p=z_p=0},$$

где Δt - толщина снимаемого с детали слоя, $мм$.

Для первого слоя $n=0$, для второго $n=1$ и т. д.

Условия теплообмена на бесконечности:

$$T_{p(x_p, y_p, z_p) \rightarrow \infty} = T_o, \quad T_{d(x_d, y_d, z_d) \rightarrow \infty} = T_d.$$

Коэффициент теплоотдачи α_1 определяется по следующей формуле [3]:

$$\alpha_1 = \frac{0,66 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,43} \cdot \lambda}{a} \quad Вт/м^2К,$$

где $Re = \frac{\omega \cdot R \cdot a}{\nu}$ - критерий Рейнольдса; $\nu = 25 \cdot 10^{-6} м^2/с$ - коэффициент

кинематической вязкости для воздуха; $Pr = 0,69$ - критерий Прандтля; $\lambda = 3,34 \cdot 10^{-2} Вт/м^2К$ - коэффициент теплопроводности воздуха.

Коэффициент теплоотдачи α_2 определяется по следующей формуле [3]

$$\alpha_2 = \frac{0,5(Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot \lambda}{e} \quad Вт/м^2К,$$

где $Gr = \beta_t \frac{g \cdot e^3 \cdot \Delta T}{\nu^2}$, $\beta_t = 1/293 [1/K]$ - коэффициент объемного расширения воздуха, $\Delta T = (100...150) K$ - температурный перепад между поверхностью обрабатываемой детали и окружающей средой (воздухом); $g = 9,81 м/с^2$ - ускорение свободного падения.

Мощности источников теплоты можно рассчитать по следующим формулам:

$$Q_p = \frac{Pz\omega R}{abd} \text{ Вт/м}^3, Q_{\ddot{a}} = \frac{Pz\omega R}{efg} \text{ Вт/м}^3,$$

где Pz – сила резания, рассчитываемая по режимам резания, H .

Дифференциальные уравнения теплопроводности совместно с начальными и граничными условиями решаются численным методом.

Заменим дифференциальные операторы уравнений теплопроводности (1) и (2) разностными операторами [4]:

- для режущей пластины:

$$\begin{aligned} \frac{T_{m+1,i,j,k}^p - T_{m,i,j,k}^p}{\Delta\tau} = & \frac{\lambda_p}{c_p \rho_p} \left(\frac{T_{m,i+1,j,k}^p - 2T_{m,i,j,k}^p + T_{m,i-1,j,k}^p}{\Delta x_p^2} + \right. \\ & \left. + \frac{T_{m,i,j+1,k}^p - 2T_{m,i,j,k}^p + T_{m,i,j-1,k}^p}{\Delta y_p^2} + \frac{T_{m,i,j,k+1}^p - 2T_{m,i,j,k}^p + T_{m,i,j,k-1}^p}{\Delta z_p^2} \right) + \\ & + \omega_p R \left(\frac{T_{m,i+1,j,k}^p - T_{m,i,j,k}^p}{\Delta x_p} + \frac{T_{m,i,j+1,k}^p - T_{m,i,j,k}^p}{\Delta y_p} + \frac{T_{m,i,j,k+1}^p - T_{m,i,j,k}^p}{\Delta z_p} \right) + \frac{1}{c_p \rho_p} Q_p; \end{aligned} \quad (9)$$

- для обрабатываемой детали:

$$\begin{aligned} \frac{T_{m+1,i,j,k}^d - T_{m,i,j,k}^d}{\Delta\tau} = & \frac{\lambda_d}{c_d \rho_d} \left(\frac{T_{m,i+1,j,k}^d - 2T_{m,i,j,k}^d + T_{m,i-1,j,k}^d}{\Delta x_d^2} + \right. \\ & \left. + \frac{T_{m,i,j+1,k}^d - 2T_{m,i,j,k}^d + T_{m,i,j-1,k}^d}{\Delta y_d^2} + \frac{T_{m,i,j,k+1}^d - 2T_{m,i,j,k}^d + T_{m,i,j,k-1}^d}{\Delta z_d^2} \right) + \frac{1}{c_d \rho_d} Q_d. \end{aligned} \quad (10)$$

В разностных уравнениях (9) и (10) приняты следующие индексы моменты времени m и $m+1$; $i, i+1, i-1$ - точки на разностной сетке по оси x ; $j, j+1, j-1$ - точки на разностной сетке по оси y ; $k, k+1, k-1$ - точки на разностной сетке по оси z ; $\Delta\tau$ - шаг по времени на разностной сетке; $\Delta x, \Delta y$ и Δz - шаги соответственно по осям x, y и z на разностной сетке.

К разностному виду необходимо привести также и граничные условия (3) - (8):
 - для режущей пластины:

$$\left(\frac{T_{m,i+1,j,k}^p - T_{m,i,j,k}^p}{\Delta x_p} \right) = -\alpha_1 (T_{m,i+1,j,k}^p - T_0), \quad (11)$$

$$\left(\frac{T_{m,i,j+1,k}^p - T_{m,i,j,k}^p}{\Delta y_p} \right) = -\alpha_1 (T_{m,i,j+1,k}^p - T_0), \quad (12)$$

$$\left(\frac{T_{m,i,j,k+1}^p - T_{m,i,j,k}^p}{\Delta z_p} \right) = -\alpha_1 (T_{m,i,j,k+1}^p - T_0); \quad (13)$$

- для обрабатываемой детали:

$$\left(\frac{T_{m,i+1,j,k}^d - T_{m,i,j,k}^d}{\Delta x_d} \right) = -\alpha_2 (T_{m,i+1,j,k}^d - T_0), \quad (14)$$

$$\left(\frac{T_{m,i,j+1,k}^d - T_{m,i,j,k}^d}{\Delta y_d} \right) = -\alpha_2 (T_{m,i,j+1,k}^d - T_0), \quad (15)$$

$$\left(\frac{T_{m,i,j,k+1}^d - T_{m,i,j,k}^d}{\Delta z_d} \right) = -\alpha_2 (T_{m,i,j,k+1}^d - T_0). \quad (16)$$

Решая разностные уравнения теплопроводности (9) и (10) совместно с разностными уравнениями граничных условий (10)-(16), при известных температурах $T_{m,i,j,k}^p$ и $T_{m,i,j,k}^d$ в начальный момент времени m в точках i, j, k относительно температур $T_{m+1,i,j,k}^p$ и $T_{m+1,i,j,k}^d$, можно определить температуры в тех же точках в момент времени $m+1$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Спиридонов Ф.Ф., Фирсов А.М., Смирнов В.В.** Виртуальный лабораторный комплекс исследования тепловых процессов в технологических системах // Горизонты образования. – 1999. -№ 1. –<http://edu.secna.ru>.
2. **Карташов Э.М.** Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 1985. – 480 с.
3. **Нащокин В.В.** Техническая термодинамика и теплопередача. –М.: Высшая школа, 1969. –560 с.
4. **Тихонов А.Н., Самарский А.А.** Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. –736 с.

Гюмрийский филиал ГИУА. Материал поступил в редакцию 11.09.2007.

Ա.Մ. ԱՐԶՈՒՄԱՆՅԱՆ

ԿՏՈՂ ԹԻԹԵՂԻԿԻ ԵՎ ՄՇԱԿՎՈՂ ԴԵՏԱԼԻ ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԴԱՇՏԻ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՄՈՏԵՑՈՒՄ

Դիտարկվել են գունավոր մետաղների և համաձուլվածքների նուրբ ընդհատուն մշակման դեպքում կտրող գործիքի և մշակվող նյութի ջերմաստիճանային դաշտերի հետազոտման գործընթացում ջերմափոխանցման դիֆերենցիալ հավասարումները: Սկզբնական և եզրային պայմաններով ջերմափոխանցման դիֆերենցիալ հավասարումները որոշվում են թվային եղանակներով: Ջերմահաղորդականության հավասարումների դիֆերենցիալ օպերատորները փոխարինելով տարբերակող օպերատորներով և լուծելով ջերմահաղորդականության հավասարումները, կարելի է ժամանակի ցանկացած պահի կտրող գործիքի և մշակվող դետալի ցանկացած կետում որոշել ջերմաստիճանը:

Առանցքային բառեր. դիֆերենցիալ հավասարումներ, ջերմային դաշտ, կտրող թիթեղիկ, գունավոր մետաղներ, մաթեմատիկական մոդել:

A.M. ARZUMANYAN

THE METHOD OF APPROACH OF TEMPERATURE FIELD CALCULATION IN CUTTING PLATE AND DETAIL TO BE ELABORATED

Differential equations of heat transfer during the investigation process of temperature fields of cutting instrument and elaborating material at thin intermittent elaboration of non-ferrous metals and alloys are discussed. Differential equations of heat conduction with initial and boundary conditions are solved with the numeric method. Replaying the differential operations of heat conduction equations by solving difference operators and by solving difference heat conduction equations, we can define the cutting plate temperatures in different points and elaborated detail at any period of time.

Keywords: differential equations, heat field, cutting plate, mathematical model, non-ferrous metals.

В.К. АБРАМЯН, С.П. ДАВТЯН, С.Н. ЕНГИБАРЯН

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ИНИЦИИРОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ВЗРЫВА

Рассматривается электродинамическая природа реологического взрыва (РВ) на примере прессования мелкозернистого диэлектрического кристаллического нитрата свинца. Показано, что оно сопровождается электризацией образца, которое в порах и микротрещинах прессованного образца образует частичные разряды. Определены условия образования и продолжительности разрядов, поглощения энергии, а также энергетические и частотные характеристики частичных разрядов.

Ключевые слова: реологический взрыв, прессование, сдвиг, электризация, частичные разряды, частотные и энергетические спектры, поглощение энергии, взрывоопасность.

Явление “реологического взрыва” подразумевает инициирование мгновенной химической реакции в твердом диэлектрическом теле, одновременно подвергнутом сильному одноосному сжатию и сдвигу [1-4]. Из анализа данных указанных работ следует однозначный вывод о том, что при тех давлениях, которые были использованы в экспериментах – $(6-60) \cdot 10^3$ Па, не имеет место деформация внешних электронных оболочек атомов, т.е. при этом отсутствуют внутриатомные процессы. Явление “реологического взрыва” (РВ) некоторые исследователи стали применять для реализации различных химических реакций вплоть до гомо- или сополимеризации из мономеров или готовых полимеров, которые в нормальных условиях не протекают. Скорости подобных “твердотельных” реакций на 3...8 порядков выше, чем скорости аналогичных реакций в газовой фазе. Очевидно, что указанные реакции не связаны с резким усилением диффузионных явлений, т.к. при формальных оценках значений коэффициентов диффузии оно оказывается на 10...15 порядков выше, чем в обычных условиях, из чего, собственно, и следует, что диффузия к этим процессам не имеет отношения [5-8].

В.И. Гольданский называет РВ “химическим ускорителем” [9], но при этом никакой аналогии между безактивационными “холодными” реакциями и реакциями при РВ нет, т.к. низкие температуры не могут заменить высокое давление, а аналога сдвига при “холодных” реакциях вообще нет.

Следует указать также, что в хороших проводниках [10] реологического взрыва не наблюдается, однако он происходит в неметаллических смесях с металлическими порошками или солями [11]. Это уже указывает на электродинамическую природу РВ. Последующая работа В.А. Закревского [12] подтверждает этот вывод. Он показал, что механическое разрушение любого твердого тела представляет собой сложный электронный и ионный процесс. При этом происходит разрыв ковалентных, ионных или иных межатомных связей, приводящих к поляризации, ионизации, появлению свободных радикалов и ион-радикалов, образованию не только локального температурного, но и сильного локального электрического поля, т.е. множественных микропробоев. Оставляя

за пределами данной статьи интерпретацию сопровождающих взрывов при высоких давлениях (ВД) физико-химических процессов, приведём наши данные для доказательства электродинамической природы РВ с учетом того факта, что сдвиг в вышеуказанных опытах приводит к сильной статической электризации (СЭ) (возникновению сильного электрического поля) и нагреву трением своего рода “пускового механизма”. В качестве аналога нами рассматриваются несанкционированные срабатывания (детонирования) высокочувствительных изделий при их производстве, транспортировке и хранении, сопровождающиеся разрушительными последствиями, в частности, в оборонной промышленности.

В горной и оборонной промышленности при проведении взрывных работ широко используются изделия с двухкомпонентной диэлектрической системой, одним из которых является прессованный высокочувствительный порошкообразный материал. В процессе прессования верхний слой, обладающий высокими диэлектрическими свойствами, приобретает “электростатические” заряды, которые создают сильное электрическое поле с потенциалом на поверхности слоя около $(1-2) \cdot 10^3$ В. Проведенный анализ случаев несанкционированных срабатываний изделий при их производстве, транспортировке и хранении свидетельствует о необходимости изучения качественного и количественного изменения физико-химических характеристик таких систем под влиянием поля “статического электричества”.

Важным фактором в процессе исследования влияния электрического поля и обусловленных этим полем “частичных разрядов” (ЧР) является образование пор и микротрещин в образце и их развитие. Из-за остаточных перенапряжений и электродинамических сил ЧР, возникающих, в частности, при нарушении адгезионных связей [13], завершение образования микроструктуры образца после прессования продолжается довольно долго. Наложение внешнего электрического поля на этот процесс приводит к существенному увеличению энергии ЧР и повышению их роли в тепло- и массообменных процессах, в том числе в иницировании зажигания высокочувствительного компонента изделия. Например, процесс прессования порошкообразных диэлектрических материалов оказывает существенное влияние на релаксацию зарядов в двухкомпонентной диэлектрической системе. В рассматриваемых изделиях движение “электростатических” зарядов направлено с верхнего заряженного слоя на нижний слой. Это обусловлено высокими диэлектрическими свойствами ($\sim 10^{13}$ Ом.м) верхнего заряженного слоя и слабым выражением диэлектрических свойств ($\sim 10^9$ Ом.м) нижнего слоя. В этих условиях постоянная времени релаксации, рассчитанная по приближенному методу Хоу [14], выражается по формуле

$$T = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \rho}{1 + r/h - \sqrt{1 + (r/h)^2}},$$

где ε_0 – электрическая постоянная; ε и ρ – диэлектрическая проницаемость и удельное электрическое сопротивление образца; r и h – радиус и высота цилиндрического образца.

Однако следует учесть, что значение T существенно изменяется вследствие изменения ρ образца в процессе и после завершения прессования. При этом изменение ρ зависит от характера процесса прессования. В качестве примера на рис.1а приводится

характерное изменение сопротивления R образца в течение времени после прессования сухого порошкообразного $Pb(NO_3)_2$ при различных давлениях в интервале $(1,25 \dots 2,25) \cdot 10^8 \text{ Па}$, на рис. 16 - изменение сопротивления R прессованного при $P=1,8 \cdot 10^8 \text{ Па}$ образца в зависимости от температуры T, K .

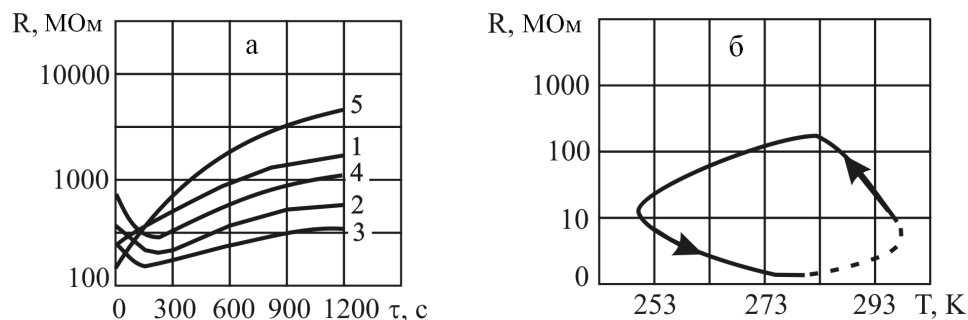


Рис.1. Зависимость удельного сопротивления образцов, прессованных при: а- различных давлениях от времени после прессования; 1 – 125 МПа; 2 - 150 МПа; 3 - 175 МПа; 4 - 200 МПа; 5 - 225 МПа; б - $P=180 \text{ МПа}$ от температуры

Следует отметить, что указанный характер изменения R в зависимости от температуры является общим для большой группы материалов, испытанных нами. Важным в этих испытаниях является то обстоятельство, что при достижении сопротивления образца $10^6\text{-}10^7 \text{ Ом}$ в нем возникают ЧР при очень низких приложенных к образцу напряжениях (около 10 В). В этой аномалии, по-видимому, существенную роль играет эмиссия электронов, обнаруженная Б.В. Дерягиным и его сотрудниками при образовании микротрещин в монолитных телах [13], которые служат в качестве “спускового механизма” для возникновения более мощных ЧР. Восстановление первоначального значения сопротивления образца при комнатной температуре происходит в течение 3...4 ч. Этот участок характеристики на рис. 1 б указан пунктиром. О важной роли ЧР в изменении электрофизических характеристик прессованных образцов свидетельствует характерная зависимость пробивной напряженности поля в образце от его плотности (рис. 2а).

Увеличение плотности упаковки (давления прессования) образца приводит к сжатию пор и, в соответствии с законом Пашена, увеличению пробивной напряженности поля. В соответствии с этим законом существуют критические значения размеров пор и трещин, при которых пробивная напряженность поля минимальная. Сказанное в полной мере подтверждается снятой зависимостью напряжения возникновения ЧР от давления прессования $PbCNS$ (рис. 2 б).

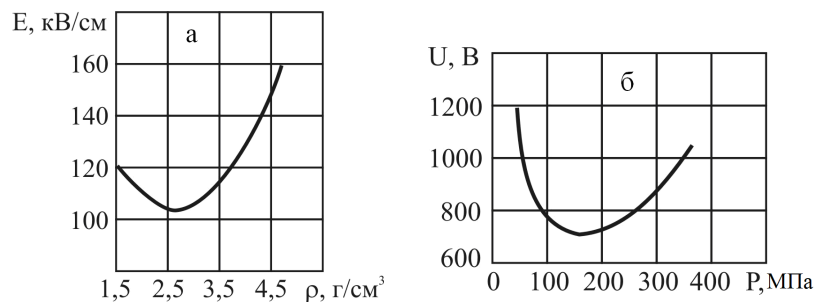


Рис. 2. Зависимости пробивной напряженности поля от плотности образца (а) и напряжения возникновения ЧР от давления прессования образца (б)

При этом, как показывает опыт, увеличивается также частота следования ЧР. Например, при увеличении давления от $2,5 \cdot 10^8$ до $4,5 \cdot 10^8$ Па частота ЧР уменьшается от 35 до 4 Гц. Характерно, что при одной и той же большой плотности образцов увеличение размера кристаллов продукта снижает значение пробивной напряженности поля. Насыщение прессованных образцов глицерином, обладающим примерно такой же электрической прочностью, что и образец, не приводит к существенному изменению пробивной напряженности поля. В то же время при насыщении образца парафином, имеющим более высокую электрическую прочность, существенно увеличивается пробивное значение напряженности поля. При снятии зависимости частоты следования ЧР от величины приложенного напряжения при различных давлениях прессования наблюдается изменение частоты в течение времени. Этот факт свидетельствует о нарастании ЧР вследствие лавинообразного переключения и включения пор и трещин в образце. Анализ экспериментальных результатов зависимости частоты ЧР от времени при различных толщинах образца свидетельствует о том, что существуют определенное количество, размеры и формы пор и трещин, при которых отсутствует лавинообразное нарастание ЧР в образце. Уменьшение толщины образца объективно приводит к увеличению пробивной напряженности поля из-за ослабления неоднородности распределения поля. Наблюдаемые ЧР в образце оставляют темные следы, которые углубляются клинообразно внутрь образца. Это свидетельствует о важной роли ЧР в физико-химических превращениях в образце, в частности, в диффузионном характере тепло- и массообмена.

Определенный практический интерес представляет анализ влияния на величину омического тока, частоту и амплитуду ЧР введенного в состав прессованного диэлектрического образца небольшого количества (0,5...1,5 %) графита. Выяснилось, что содержание такого количества графита практически не оказывает влияния на величину омического тока. В то же время оно оказывает существенное влияние на амплитуду (энергию) ЧР. Это, в конечном итоге, приводит к несанкционированному срабатыванию изделия. Увеличение содержания графита до 3,5...4,0 % приводит к резкому увеличению омического тока до 1000 мкА при полном отсутствии ЧР. При этом не были зафиксированы случаи срабатывания изделия.

Таким образом, подтверждена решающая роль ЧР в инициировании зажигания взрывоопасной смеси в проведенных экспериментах. Однако возникают трудности, связанные с объяснением зажигающей способности ЧР, если учесть их небольшую энергию (порядка 10^{-9} - 10^{-8} Дж). Спектроскопические исследования показали, что выделяемая ЧР энергия в основном приходится на диапазон длин волн $\lambda = 2500 \dots 4300$ А. Характерно, что ряд экспериментов для взрывчатых веществ подтверждает резонансное поглощение электромагнитной энергии в этом диапазоне длин волн [15]. Полученные результаты, наряду с результатами развития теории протекания [16], позволяют выработать конкретные предложения по устранению опасных проявлений “технологической” электризации в рассматриваемых изделиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бриджмен П.В. Физика высоких давлений.- М.: ГТТЛ, 1935.- 342с.
2. Бриджмен П.В. Новейшие работы в области высоких давлений.- М.: ИЛ, 1948.- 300 с.
3. Бриджмен П.В. Образование больших пластических деформаций и разрыва.- М.: ИЛ, 1955.- 444 с.
4. Жаров А.А. // ЖВХО им. Д.И. Менделеева.- 1973. - Т. 1818, N1.- С. 73-79.
5. Ениколопян Н.С. Проблемы химической кинетики.- М.: Наука, 1973.
6. Капустян В.М., Жаров А.А. Ениколопян Н.С. //ДАН СССР.- 1968.- Т. 179.- С. 627.
7. Ениколопян Н.С // ДАН СССР.- 1985. - Т. 283, N4.- С. 897-899.
8. Ениколопян Н.С., Мхитарян А.А., Карагезян А.С. //ДАН СССР.- 1986.- Т. 288, N3.-С.657-660.
9. Гольданский В.И. // ЖВХО им Д.И. Менделеева.- 1073.- Т. 18, N 1.- С. 2-6.
10. Френкель Я.И. Введение в теорию металлов. 3 изд.-М.-Л., 1958.- 265 с.
11. Ениколопян Н.С., Мхитарян А.А., Карагезян А.С. // ДАН СССР.- 1987.- Т. 294, N4.- С. 312-315.
12. Закревский В.А., Слуцкер А.И. // ВМС.- 1984.- Т. 26, N6.- С. 1201-1296.
13. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел.- М.: Наука, 1973.- 27с.
14. Миролубов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.А. и др. Методы расчета электрических печей. – М.: Высшая школа, 1963.- 415 с.
15. Кук Мелвин А. Наука о промышленных взрывчатых веществах / Пер. с англ. Б.Н. Кукиба; Под ред. Г.П. Демидова.- М.: Недра, 1980.- 455 с.
16. Шкловский Б.И., Эфрос А.А. Теория протекания и проводимость сильно неоднородных сред // УФН.- 1975.- Т. 117, вып. 3.- С. 401-403.

Военная академия связи (СПб), ГИУА, ИОНХ НАН РА. Материал поступил в редакцию 09.11.2007.

Վ.Ղ. ԱԲՐԱՄՅԱՆ, Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ, Ս.Ն. ԵՆԳԻԲԱՐՅԱՆ

ԵԼԵԿՏՐԱԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՊԱՅԹՅՈՒՆԻ ԶԱՐՈՒՑՄԱՆ ԷԼԵԿՏՐԱԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ
ՄԵԽԱՆԻԶՄ

Մի շարք գիտական աշխատանքների տվյալներից և հոդվածի հեղինակների աշխատանքներից բխում է ԵԼԵԿՏՐԱԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՊԱՅԹՅՈՒՆԻ ԶԱՐՈՒՑՄԱՆ ԷԼԵԿՏՐԱԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄ: Մասնավորապես ցույց է տրված, որ մանրահատիկ մեկուսիչ կապարի նիտրատի բյուրեղների սեղմումը ընթանում է նմուշի էլեկտրականացումով, որը նրա ծակոտիներում և մանրաճեղքերում առաջ է բերում «մասնակի պարպումներ» (ՄՊ): Որոշված են ՄՊ-ի առաջացման և վերացման պայմանները, էներգետիկ և հաճախականային բնութագրերը և էներգիայի կլանման պայմանները:

Առանցքային բառեր. ռեոլոգիական պայթյուն, մամլում, սահք, էլեկտրականացում, մասնիկային լիցքեր, հաճախականային և էներգետիկ սպեկտրներ, էներգիայի կլանում, պայթյունավտանգություն:

V.K. ABRAMYAN, S.P. DAVTYAN, S.N. YENGIBARYAN

ELECTRODYNAMIC MECHANISM of INITIATION « REOLOGICAL EXPLOSION»

Data from several scientific studies prove electrostatics nature of reological exposure. Particularly, it is shown that pressing fine-grained dielectric crystalline lead nitrate is accompanied by electrization of the specimen, which forms "partial discharges" in the pores and splits of the pressed specimen. The conditions of formation, duration of discharges and absorption of the energy are defined and the energetic and frequency characteristics of "partial discharges" are defined as well.

Keywords: reological exposure, pressing, shift, electrization, partial discharges, frequency and energetic spectra, energy absorption, danger of exposure.

Վ.Հ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Ն.Ն. ՀԱԿՈԲՅԱՆ, Ա.Ա. ԱՅՎԱԶՅԱՆ,
Մ.Է. ՍԱՍՈՒՆՅԱՆ

ՏԱՊԱՍԱՐԻ ՔՐՈՄԻՏԱՅԻՆ ՀԱՆՔԱՆՅՈՒԹԵՐԻ ՌԵԱԿՏԻՈՆ ԿԱՐՈՂՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՌԻՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Քննարկվում են Սևանի Տապասարի քրոմիտային հանքանյութերի ռեակցիոն կարողությունների բացահայտման հարցերը, դրանք մետալուրգիական նպատակով կիրառելու համար: Ծակոտկենության, միներալային կազմի և կառուցվածքի փոփոխությունները հանքանյութում՝ կախված օքսիդիչ միջավայրում դրանց ջերմային մշակումից, հնարավորություն կտան ընտրել քրոմիտների հարստացման նոր եղանակներ, մեծացնել Cr_2O_3 -ի քանակը հանքանյութում և մշակել նոր այլընտրանքային տեխնոլոգիաներ քրոմիտներից քրոմի և դրա համաձուլվածքների ստացման համար: Վերջինիս ստացված արդյունքները հաստատագրվել են ռենտգենաֆազային, մանրադիտակային և ջերմադրային վերլուծության եղանակներով:

Առանցքային բառեր. կառուցվածք, քրոմիտ, հանքանյութ, քրոմ, ջերմային մշակում:

Քրոմիտային հանքանյութերը մաքուր քրոմի և քրոմ պարունակող համաձուլվածքների ստացման միակ հումքն են: Վերջերս հայտնաբերված Տապասարի քրոմիտային հանքավայրերի հետ կապված՝ անհրաժեշտություն է առաջանում ուսումնասիրել և բացահայտել այդ հանքանյութերի մետալուրգիական հատկությունները: Հատկապես կարևոր են վերջիններիս ռեակցիոն կարողությունների բացահայտման հարցերը, կապված դրանց ծակոտկենության, միներալային կազմի և կառուցվածքի փոփոխությունների հետ, օքսիդիչ միջավայրում հանքանյութի ջերմային մշակման գործընթացում:

Այդ հատկությունների ուսումնասիրության արդյունքում ստացված տվյալները թույլ կտան փնտրել Տապասարի քրոմիտային հանքանյութերի հարստացման այլընտրանքային եղանակներ, քրոմի օքսիդի բարձր պարունակության խտանյութի ստացմամբ և մշակել արդի տեխնոլոգիաներ՝ Տապասարի քրոմիտային հանքանյութերից քրոմի և դրա համաձուլվածքների ստացման համար:

Աշխատանքի նպատակն է՝ կատարել Տապասարի քրոմիտների համալիր ուսումնասիրություններ՝ այդ հանքանյութերից քրոմի առավելագույնս կորզման համար: Տապասարի քրոմիտների միներալոգիական կազմը, ըստ ռենտգենաֆազ վերլուծության տվյալների, հետևյալն է. քրոմպիկոտիտ- $(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{Cr}, \text{Al})_2\text{O}_4$, պիկոքրոմիտ MgCr_2O_4 , սերպենտիններ- $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, $\text{Mg}_{4.5}\text{Al}_{1.5}(\text{Si}_{2.5}\text{Al}_{1.5})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$, օլիվիններ - $2(\text{Fe}_{0.4}\text{Mg}_{0.6})\text{O} \cdot \text{SiO}_2$, բրուսիտ- $\text{Mg}(\text{OH})_2$:

Կատարվել են այդ հանքանյութերի հարստացման ուսումնասիրություններ [1], որոնք ցույց են տվել [1], որ 46,03% Cr_2O_3 -ի պարունակությամբ Տապասարի քրոմիտային հանքանյութերից գրավիտացիոն հարստացման եղանակով կարելի է ստանալ հետևյալ քիմիական կազմով քրոմիտային խտանյութ (աղ.1):

Տապասարի քրոմիտային խտանյութի քիմիական կազմը, %										
Cr ₂ O ₃	FeO _{բնդ}	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	CaO	Cr ₂ O ₃ / FeO _{բնդ}	MgO/ Al ₂ O ₃	Գու- մարը
52,68	13,64	10,95	2,99	5,88	20,38	5,06	2,36	3,86	3,47	100,00

Աղյուսակի տվյալներից երևում է, որ ստացված խտանյութը, ըստ Cr₂O₃/FeO_{բնդ} և MgO/Al₂O₃ հարաբերությունների ու Cr₂O₃-ի պարունակության, միանգամայն բավարար է մետալուրգիական նպատակներով կիրառելու համար:

Անհրաժեշտ է պարզել, թե ինչպիսի ֆազային և միներալոգիական փոփոխություններ են կատարվում այդ հանքանյութերում ջերմային մշակման ժամանակ:

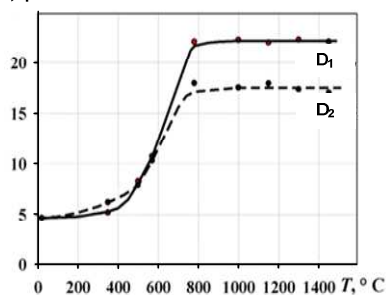
Քանի որ քրոմիտների ռեակցիոն կարողությունների մեծացումն առաջին հերթին կապված է դրանց ծակոտկենության մեծացման հետ, որոշվել է խտանյութի խտությունը (D) ջերմային մշակումից առաջ և հետո, հիդրոստատիկ կշռումով կերոսինի մեջ, ըստ հետևյալ բանաձևի [2].

$$D = d S / S - (G_1 - G_2),$$

որտեղ S-ը փորձանմուշի զանգվածն է, գ, d-ն՝ կերոսինի խտությունը, կգ/մ³-ով, G₁-ը՝ պիկնոմետրի զանգվածը փորձանմուշով, G₂-ը՝ պիկնոմետրի զանգվածն առանց փորձանմուշի:

Փորձերի արդյունքները ցույց են տվել, որ տաքացման ժամանակ հանքանյութը կորցնում է իր կազմում առկա աղտորված ջուրը, որի հետևանքով նրանում առաջանում են տարբեր չափերի ծակոտիներ և անցքեր: 790...800 (C-ում քրոմիտային խտանյութի խտությունը նվազում է մոտ 1,4-անգամ (նկ. 1) և մնում է անփոփոխ ավելի բարձր ջերմաստիճաններում՝ ընդհուպ մինչև 1500 (C: Հանքանյութի ծակոտկենությունը պայմանավորված է նաև դրանում առկա ոչ հանքային միացությունների քանակով: Ջերմային մշակման հետևանքով հանքանյութում առաջացած ծակոտիների չափերը հասնում են մոտ 5-10 մկմ-ի, ինչը գերազանցում է գազային օքսիդիչի՝ թթվածնի մոլեկուլների տրամագիծը մի քանի հարյուր անգամ: Դա է պատճառը, որ հանքանյութում առաջացած ծակոտիները նպաստում են օքսիդացման գործընթացին (թթվածնի մոլեկուլները հեշտությամբ թափանցում են հանքանյութի մեջ):

D, գ/մ³



Նկ.1. Քրոմիտային հանքանյութի խտության կախումը ջերմային մշակման ջերմաստիճանից՝ 1 - ելանյութ փորձանմուշ, 2 - փորձանմուշ՝ ջերմային մշակումից հետո

Մեզ հայտնի տվյալների [2, 3] համաձայն՝ տարբեր հանքավայրերի քրոմիտներ օքսիդանում են տարբեր արագություններով: Որքան քրոմիտում շատ են Al³⁺-ի իոնները, այնքան փոքր է Cr₂O₃-ի օքսիդացման արագությունը [3]: Հայտնի է նաև, որ

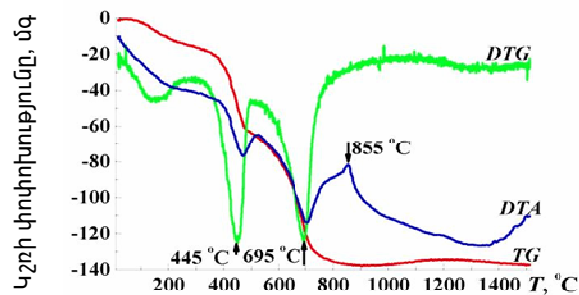
քրոմիտում Cr-ի օքսիդացումը այնքան հեշտ է ընթանում, որքան Fe^{2+} -ի քանակը փոքր է [4], հայտնի է նաև, որ պինդ նյութերում տարրերը օքսիդանում են նույն օրինաչափությամբ, ինչպես դա կատարվում է լուծույթներում: Նախ օքսիդանում է Fe^{2+} -ը մինչև Fe^{3+} , հետո միայն Cr^{3+} -մինչև Cr^{4+} -ի: Առ. 2-ում ներկայացված է քրոմիտային հանքանյութի քիմիական կազմի փոփոխությունը 1000°C ջերմային մշակման արդյունքում:

Աղյուսակ 2

Քիմիական կազմի փոփոխությունը քրոմիտային հանքանյութի 1000°C ջերմամշակման արդյունքում, տոկոս

	Cr_2O_3	Fe	FeO	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	SiO_2
Նախքան օքսիդացումը	52,68	13,64	10,93	2,99	5,00	20,38	7,06
Օքսիդացումից հետո	50,53	13,88	3,59	11,43	7,14	20,00	6,95

Ինչպես երևում է աղյուսակում բերված տվյալներից, 1000°C -ում օքսիդիչ մշակման ենթարկված նմուշում աճում է Fe^{3+} -ի քանակը և նվազում Fe^{2+} -ի քանակը: Մակայն միայն քիմիական կազմը բավարար չէ քրոմիտի ռեակցիոն կարողությունները օքսիդացման գործընթացում պարզելու համար: Կատարվել են նաև ջերմաձանրաչափական ուսումնասիրություններ՝ ջերմամշակման գործընթացում քրոմիտների վարքը պարզելու նպատակով: Ջերմաձանրաչափական ուսումնասիրությունները կատարվել են 10°C/ր արագությամբ, 2 գրամ նմուշի հետ (նկ. 2): Տաքացման ընթացքում որոշվել է նյութի կշռի կորուստը, բնորոշ ֆազային փոփոխությունները և այդ փոփոխությունների ջերմաստիճանները: Ստացված արդյունքների ուսումնասիրությունները կատարվել են ռենտգենակառուցվածքային, միկրոռենտգենասպեկտրալ և քիմիական վերլուծության եղանակներով:



Նկ. 2. Քրոմիտային հանքանյութի օքսիդացման գործընթացի ջերմազիլը՝ օքսիդիչ ջերմային մշակման արդյունքում: DTG-նմուշի զանգվածի փոփոխության արագություն, DTA-դիֆերենցիալ ջերմային վերլուծություն, TG- նմուշի զանգվածի փոփոխություն

TG կորի փոփոխությունը ցույց է տալիս, որ մինչև 350°C -ում կատարվում է ադսորբցիոն ջրի հեռացում: Քրոմիտային հանքանյութի հետագա տաքացումը բերում է բարձրջերմաստիճանային փոփոխությունների. $425\ldots 475^\circ\text{C}$ ջերմաստիճաններում տեղի է ունենում բրուսիտի քայքայում, իսկ $680\ldots 730^\circ\text{C}$ -ում՝ սերպենտինի տրոհում, որը սին ապարի հիմնական մասն է կազմում, իսկ $840\ldots 900^\circ\text{C}$ տեղի է ունենում ջրազրկված մագնեզիումի սիլիկատի տրոհում՝ ֆորստերիտի և SiO_2 -ի առաջացումով:

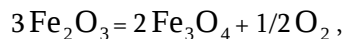
TG կորի վրա նմուշի զանգվածի որոշ ավելացում նկատվում է 1200...1260 °C ջերմաստիճաններում (աղյ. 3):

Աղյուսակ 3

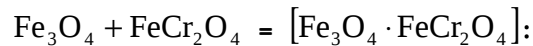
TG-ի փոփոխման ուսումնասիրության արդյունքները, օդում մինչև 1000 °C և 1500 °C տաքացնելիս (նմուշի զանգվածը՝ 2 գրամ)

Նմուշը	Զանգվածի կորուստը, %
Մինչև 1000 °C տաքացված	0,38
1000-1500 (°C տաքացված	0,22

Պարզվել է, որ նմուշի զանգվածի ավելացումը կատարվում է երկու փուլերով (նաև նշենք, որ քրոմշպինելիդի օքսիդացման գործընթացը դարձելի է): Զանգվածի առավելագույն աճ նկատվում է 1200-1260 °C ջերմաստիճանում: Ավելի բարձր ջերմաստիճաններում տաքացումը հանգեցնում է զանգվածի նվազման, որն ըստ երևույթին պայմանավորված է Fe_2O_3 -ի տրոհման գործընթացով՝ Fe_3O_4 -ի և O_2 -ի, ըստ հետևյալ ռեակցիայի՝

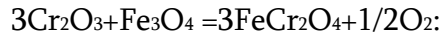


ինչպես նաև պինդ լուծույթի առաջացումով՝ $[\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{FeCr}_2\text{O}_4]$ ՝



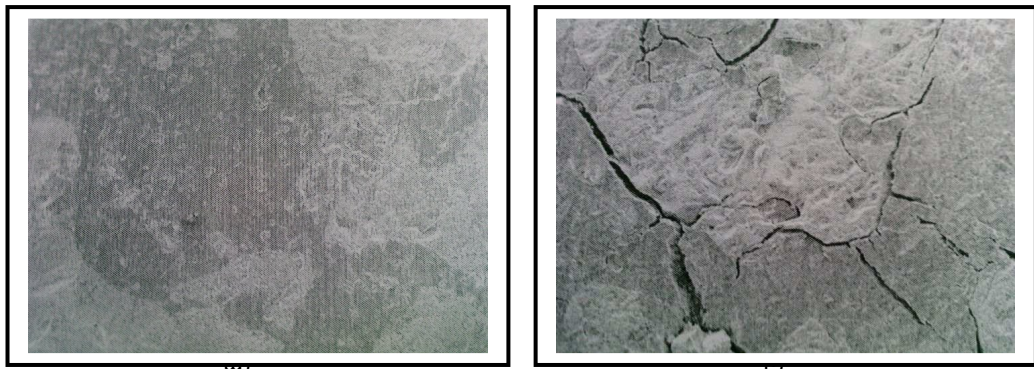
Որքան քրոմշպինելիդում երկաթը քիչ է օքսիդացել (այսինքն մեծ է $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ հարաբերությունը), այնքան մեծ է զանգվածի աճը՝ օքսիդիչ թրծման դեպքում, և այնքան ավելի հավանական է քրոմշպինելիդի բյուրեղային ցանցի քայքայումը՝ կապված օքսիդացման գործընթացի հետ: Կարելի է ընդունել, որ երկաթը (II) քրոմշպինելիդի մեջ հաջողվել է օքսիդացնել մինչև Fe_3O_4 : Սակայն երկաթի լրիվ օքսիդացում մինչև Fe_2O_3 փորձերի արդյունքներում չի հայտնաբերվել: Այս կարծիքը հաստատում են նաև այլ հեղինակներ [4,5], որոնք ուսումնասիրել են Fe-Cr-O համակարգի վիճակի դիագրամը և կատարել թերմոդինամիկական վերլուծություն: Այդ ուսումնասիրությունները ցույց են տվել, որ շպինելների օքսիդացման ժամանակ թթվածնի հենց առաջին ավելցուկ քանակները FeCr_2O_4 միացության ստեխիոմետրիկ քանակից, բերում են նոր ֆազի՝ $[\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Cr}_2\text{O}_3]$ պինդ լուծույթի, կամ ավելի ճիշտ, գործնականում ազատ Cr_2O_3 -ի առաջացման: Հետագա օքսիդացումից $[\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Cr}_2\text{O}_3]$ պինդ լուծույթի քանակն ավելանում է, և լուծույթը հարստանում է Fe_2O_3 -ի նկատմամբ: Այստեղ նորից նկատվում է, որ երկարժեք երկաթի օքսիդացումը կատարվում է մինչև Fe_3O_4 և ոչ ավելին: Անգամ ավելի բարձրաստիճան օքսիդացումը չի հանգեցնում Fe_2O_3 -ի առաջացման: Հետևաբար, քրոմիտների օքսիդացման գործընթացը տարբերվում է FeCr_2O_4 միացության ստեխիոմետրիկ քայքայման ուրվագծից: Բնական քրոմիտները տարբերվում են երկաթի քրոմիտում Mg^{2+} և Al^{3+} կատիոնների առկայությամբ: [5] աշխատանքում հեղինակները ցույց են տվել, որ Fe_2O_3 -ի անջատումը բնական շպինելային լուծույթից դժվարանում է, և $[\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Cr}_2\text{O}_3]$ պինդ լուծույթի առաջացումը թերմոդինամիկորեն դառնում է քիչ հավանական, քան

մաքուր FeCr_2O_4 -ի դեպքում: 1000°C -ից բարձր ջերմաստիճաններում քրոմի օքսիդի և մագնետիտի քանակը պակասում է, և մեծանում է երկաթի քրոմիտի քանակը: MgAl_2O_4 և MgCr_2O_4 քանակները չեն փոխվում: Հետևաբար, զանգվածի կորուստը բարձր ջերմաստիճաններում կապված է հետևյալ ռեակցիայի հետևանքով անջատված ատոմար թթվածնի հետ.



Ջերմամշակման արդյունքում ստացված նմուշներում կատարվել են մանրադիտակային ուսումնասիրություններ (նկ. 3):

Նկ.3-ից երևում է, որ ջերմային մշակման ժամանակ կատարվում է քրոմիտների ամբողջականության խախտում. առաջանում են զանազան միկրոճեղքեր, որոնք հանգեցնում են ծակոտկենության մեծացման: 1000°C ջերմաստիճանում կատարված ջերմամշակումը նպաստում է քրոմիտի ամբողջ ծավալով ճեղքերի առաջացմանը:



Նկ. 3. Հանքանյութում կատարվող փոփոխությունները ջերմային մշակումից առաջ (ա) և հետո (բ) (բաց հատվածները՝ քրոմշպինելիդ, մուգ հատվածները՝ սին ապարներ)

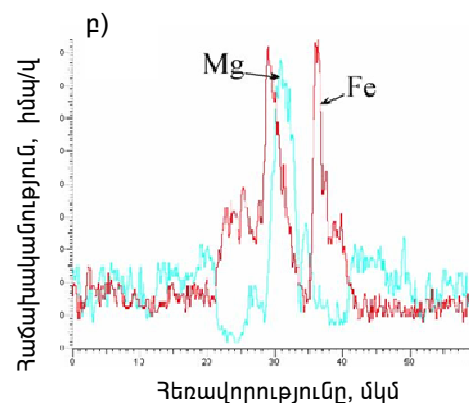
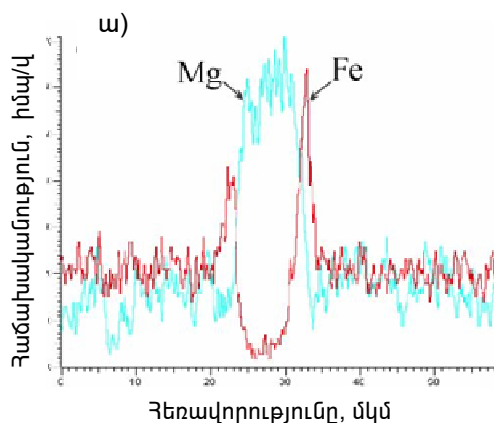
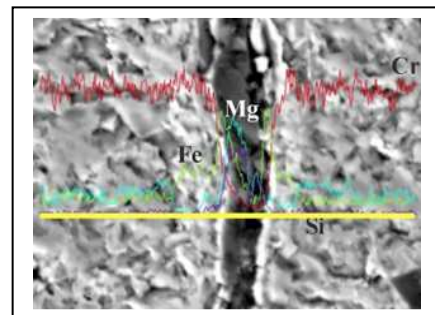
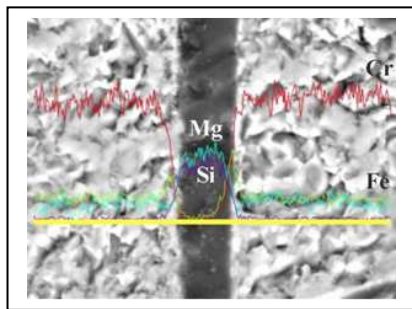
Ուսումնասիրվել է տարրերի բաշխումը քրոմշպինելիդի հատիկում (նկ.4): Քրոմիտային հանքանյութի մինչև 1000°C օքսիդիչ թրծումից հետո, հատիկի կենտրոնական մասում քրոմշպինելիդը չի փոխվում, սակայն ծայրամասերում սին ապարի հետ շփման հետևանքով մեծանում է երկաթի քանակը: Նմուշը 1000°C ջերմաստիճանում 180...240 րոպե պահելիս քրոմշպինելիդի ծայրամասերում ավելի շոշոփելի փոփոխություններ են տեղի ունենում.

- երկաթով հարուստ հատվածներն ընդարձակվում են,
- քրոմշպինելիդին հարող մագնեզիումի սիլիկատը հարստանում է երկաթով և երկաթի պարունակությամբ հավասարվում է քրոմշպինելիդին:

Վերը նշված փոփոխություններից բացի, փոփոխվում է նաև քրոմշպինելիդի բաղադրությունը: Երկաթի քանակը քրոմշպինելիդի հատիկում փոքրանում է, միաժամանակ Cr/Fe հարաբերությունը 2,84-ից հասնում է մինչև 6,0-ի(աղ.4):

Քրոմիտային հանքանյութում քրոմիտների հատիկի և
սերպենտինի տվյալները(զանգ. մաս)

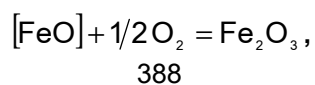
	O	Mg	Al	Si	Cr	Fe
1	42,51	28,09	-	24,48	0,49	14,22
2	30,82	1,64	5,30	0,51	38,84	22,90
3	3202	246	2,25	0,64	12,02	50,62

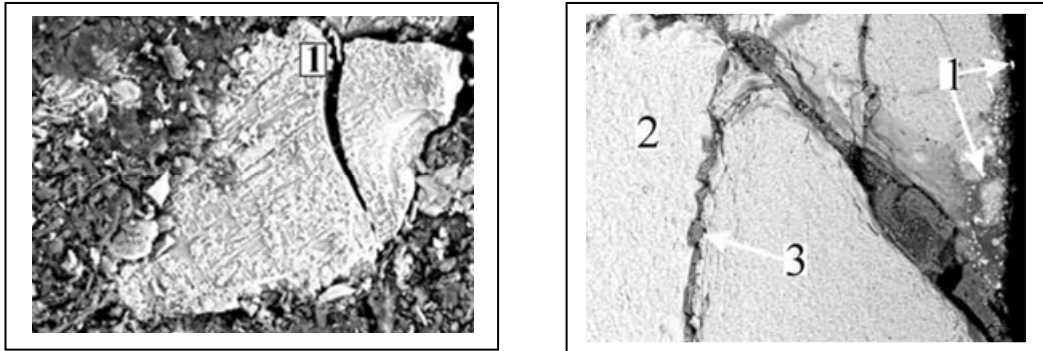
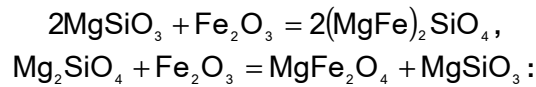


Նկ.4. 1000(C-ում 0 բուպե ա) և 240 բուպե բ) պահված փորձանմուշների գծային սկանացման պատկերները: (Բաց տիրույթը՝ քրոմշպինելիդ, մուգ տիրույթը՝ սին ապարներ)

Երկաթի վարքը քրոմիտային հանքանյութի օքսիդիչ թրծման գործընթացում ճշտելու համար կատարվել է հանքանյութից անջատված քրոմշպինելիդի և սերպենտինի փոխազդեցության մանրադիտակային ուսումնասիրություն (նկ. 5):

Այսպիսով, քրոմշպինելիդի օքսիդիչ թրծման դեպքում երկաթի օքսիդները քրոմշպինելիդի բյուրեղային ցանցից միգրացիայի են ենթարկվում դեպի սիլիկատներ՝ առաջացնելով օլիվիններ, մագնեզիումի մետասիլիկատ և մագնեզիումի ֆերիտ, ըստ հետևյալ ռեակցիաների.





Նկ.5. Քրոմշպինելիդի և սերպենտինի կոճակների միկրոսկոպիկ ուսումնասիրությունները
 ա) ընդհանուր տեսքը; բ) քրոմշպինելիդի հատիկը
 1-սերպենտին; 2- քրոմշպինելիդի հատիկը; 3-անջատված ֆազը

Բերված տվյալներից երևում է, որ մինչև 1000°C օդում տաքացնելիս, քրոմշպինելիդի հատիկից անջատվում է ֆազ, որը հարուստ է երկաթով: Այսպիսով, փորձագիտական տվյալները ևս մեկ անգամ հաստատագրում են քրոմշպինելիդի բյուրեղային ցանցից երկաթի կատիոնների միգրացիան դեպի սիլիկատներ:

Ուսումնասիրվել են նաև քրոմիտային խտանյութի մագնիսական հատկությունները: Նախնական փորձագիտական հետազոտությունները ցույց տվեցին, որ քրոմիտային խտանյութը ջերմային օքսիդիչ մշակումից հետո ցուցաբերում է մագնիսական հատկություններ, մինչև 1000°C քրոմիտների օքսիդացման արդյունքում Fe_3O_4 -ի առաջացման շնորհիվ: 1000°C -ում ջերմային մշակման ենթարկված և չենթարկված փորձանմուշների ռենտգենագրերի համեմատությունները ցույց տվեցին, որ ջերմային մշակման ենթարկված փորձանմուշները հարստացված են քրոմշպինելիդով (պիկոքքրոմիտով), իսկ ջերմային մշակման չենթարկված փորձանմուշները հարուստ են սիլիկատային սին ապարներով՝ սերպենտինիտով: 1000°C -ում 90 րոպե իզոթերմ պահված փորձանմուշներում մագնիսական և ոչ մագնիսական բաղադրամասերի հարաբերությունը փոխվում է: Մագնիսական ֆրակցիան հիմնականում սին ապարներ են՝ հարստացված երկաթի օքսիդներով և երկաթի ու մագնեզիումի օրոտսիլիկատներով [5]: Դա հաստատում է ջերմային մշակման ժամանակ երկաթի կատիոնների միգրացիան դեպի սին ապարը: Ոչ մագնիսական ֆրակցիան ընդակառակը՝ հարստացված է բարձրաքրոմիտային շպինելներով: Աղ. 5-ում ներկայացված են քրոմիտների մագնիսական և ոչ մագնիսական ֆրակցիաների քիմիական վերլուծության արդյունքները:

$\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}_{\text{ընդհ.}}$ հարաբերությունը ջերմային օքսիդիչ մշակումից ստացված ոչ մագնիսային ֆրակցիայում ավելի բարձր է, քան ելանյութ չմշակված ֆրակցիայում, բացի այդ, մեծացել է Cr_2O_3 -ի և $\text{FeO}_{\text{ընդհ.}}$ -ի քանակը ոչ մագնիսական ֆրակցիայում: Այդ ֆրակցիայում $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ հարաբերությունը զգալի փոքրացել է, փոքրացել է նաև MgO -

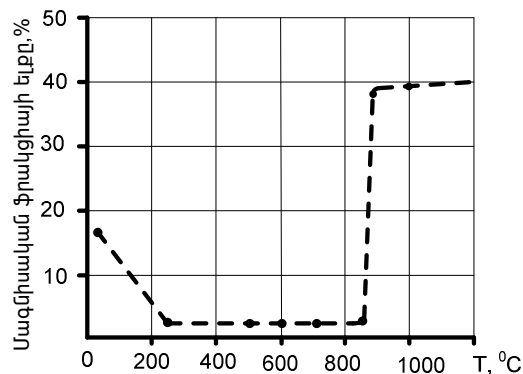
ի և Al_2O_3 -ի քանակը: Որոշվել է նաև մագնիսական ֆրակցիայի ելքը ջերմամշակված փորձանմուշում:

Աղյուսակ 5

Տապասարի քրոմիտային խտանյութի մագնիսական և ոչ մագնիսական ֆրակցիաների քիմիական կազմը, %

Տապասարի քրոմիտային խտանյութ			
Քիմիական կազմը, %	Էլանյութ	մագն. քաղաղրամաս	ոչ մագն. քաղաղրամաս
Cr_2O_3	52,68	28,84	50,10
$FeO_{ընդհ.}$	13,64	9,10	13,39
Al_2O_3	5,88	4,54	7,50
MgO	20,38	37,73	21,21
SiO_2	5,06	21,10	8,08
$Cr_2O_3 / FeO_{ընդհ.}$	3,86	3,18	3,74
MgO / Al_2O_3	3,47	39,7	-
Ելքը մ.ֆ./ոչ մ.ֆ.			
Cr-ով հարստացումը բացարձակ, գանգվ.	-	-	0,42
հարստացման գործակիցը	-	-	1,01
Cr-ի կորուստները, գ (100գ) (ոչ մ.ֆ.ֆրակցիա)		11,45	-

Ստացված արդյունքները կարող են տեսական հիմք հանդիսանալ Տապասարի քրոմիտների հարստացման նոր տեխնոլոգիաների ստեղծման գործում, քանի որ ֆլոտացիոն հարստացումն ավելի թանկ է և մեծացնում է ստացված խտանյութի կեղտոտվածությունը [3]: Պետք է նշել նաև, որ քրոմիտների օքսիդիչ թրծման տևողության ավելացումը մեծացնում է հարստացման գործակիցը 1,4 անգամ, իսկ Cr/Fe հարաբերությունը քրոմչափնելիդի հատիկում մեծանում է 3-ից մինչև 6 (նկ. 6):



Նկ. 6. Մագնիսական ֆրակցիայի ելքի կախումը քրոմիտի ջերմային մշակման ջերմաստիճանից

Եզրակացություններ

1. Փորձնականորեն ցույց է տրվել, որ ջերմային մշակումը զգալի փոփոխությունների է ենթարկում Տապասարի քրոմային խտանյութի կառուցվածքը: Ըստ որում՝ 780...800°C օքսիդիչ թրծումից հետո աճում է խտանյութի տեսակարար կշիռը, հետևաբար, նաև ծակոտկենությունը, որն այլևս չի փոխվում ջերմաստիճանի՝ մինչև 1500°C բարձրացումից: Ծակոտկենության բարձրացումը հիմնականում կապված է ադսորբված ջրի հեռացման և շպինելների քայքայման հետ:
2. Ցույց է տրվել, որ օքսիդիչ միջավայրում քրոմիտների 900...1000°C ջերմային մշակման արդյունքում երկաթի կատիոնները քրոմշպինելիդի հատիկներից դիֆուզվում են «քրոմշպինելիդ- սին ապար» սահմանը և առաջացնում մագնեզոֆերիտ ($Mg_2Fe_2O_4$) և օլիվին ($FeMgSiO_4$):
3. Քիմիական վերլուծության արդյունքներով որոշված է կատիոնների բաշխումը «քրոմշպինելիդ- սին ապար» սահմանում, որոշվել է երկաթի կատիոնների դիֆուզիան քրոմշպինելիդում 1000°C ջերմային մշակման արդյունքում:
4. Ուսումնասիրվել է մագնիսական սեպարացիայի եղանակով քրոմիտների հարստացման գործընթացը: Որոշվել է մագնիսական ֆրակցիայի ելքի կախումը օքսիդիչ պայմաններում ջերմային մշակման ջերմաստիճանից: Ցույց է տրվել, որ նախապես 900...1000°C ջերմային մշակման ենթարկելուց հետո քրոմիտները կարելի է հարստացնել մագնիսական սեպարացիայով:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Մարտիրոսյան Վ., Հակոբյան Ն., Սասունցյան Մ.** Սևանի Տապասարի հանքավայրի քրոմիտների հարստացման գործընթացի ուսումնասիրությունները // ՀՊՃՀ (Պոլիտեխնիկ) գիտական տարեկան կոնֆերանս նյութերի ժողովածու. Մաս II. - Երևան, 2006. - էջ 610-613:
2. **Verwey E.I., Heilmann E.I., Chem.Phys J.** - 1967. - V. 15, N 4.
3. **Киреева М.В., Агеева Т.Н., Павлова Т.А.** Труды УНИХИМ. - 1969. - Вып. VIII.
4. **Есип О.А., Гельд П.В.** Физическая химия пирометаллических процессов. - М.: Металлургиздат, 1960.

5. **Михайлов Г.Г., Пушкаев И.Ю., Невраева К.И.** Металлургические свойства хромовых руд Полярного Урала // Сборник трудов 11 Международной научно-практической конференции “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности” / Под ред. А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко, В. Ф. Самохина.- СПб.: Изд-во политех. ун-та, 2006.- С. 304-305.

ՀՊՃՀ. Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 24.11.2007:

В.А. МАРТИРОСЯН, Н.Н. АКОПЯН, А.А. АЙВАЗЯН, М.Э. САСУНЦЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ХРОМИТОВЫХ РУД ТАПАСАРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Исследуются вопросы выявления реакционной способности хромитов Тапасарского месторождения с целью улучшения металлургических свойств. Показано, что изучение пористости минералогического состава и структуры руды в зависимости от тепловой обработки дает возможность обогащения этих руд по отношению к количеству Cr_2O_3 , а также позволит разработать новую альтернативную технологию переработки хромитов Тапасарского месторождения с получением хрома и хромосодержащих сплавов. Полученные результаты подтверждаются данными рентгенофазового, микроскопического и дериватографического методов анализа.

Ключевые слова: структура, хромит, руда, хром, тепловая обработка.

V.H. MARTIROSYAN, N.N. HAKOBYAN, A.A. AIVAZYAN, M.E. SASUNTSYAN

INVESTIGATION OF CHROMITE ORE REACTIVITY IN TAPASAR DEPOSIT

Problems of revealing chrome-iron ore reactivity for studying metallurgical properties are examined. It is shown that studying porosity the mineral composition and structure in terms of thermal treatment will enable to beneficiate these ores with regard to quantity (Cr_2O_3) as well, and allow to develop a new alternative technology for processing chromites of Tapasar deposit obtaining chromite and chromite-bearing alloys. The results obtained are confirmed by the data of roentgen-phase, microscopic and derivative-graphical methods of the analysis.

Keywords: structure, chromite, ore, chrome, thermal treatment.

А.С. ПЕТРОСЯН, Г.А. ТУМАНЯН, В.С. ГУКАСЯН

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АНТИФРИКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ Fe-Cr. СВОЙСТВА И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ

Разработана технология получения порошковых композиционных материалов на основе матрицы <Fe-Cr> антифрикционного назначения. На основе растворного Fe[Ni], Ni[Mo], Fe[Mo] и интерметаллидного [FeCr, Fe₃₆Cr₁₂Mo₁₀, Fe₂Mo] механизмов путем добавления твердых смазок (C, MoS₂) получены порошковые композиционные материалы антифрикционного назначения ($\mu=0,032$ и $i=0,036$ гр/км), работающие в условиях сухого трения. Показаны механические, триботехнические свойства и дан микроструктурный анализ композиционных антифрикционных материалов.

Ключевые слова: экструзия, композиционные материалы, механические и антифрикционные свойства, микроструктурный анализ.

Конструкционные детали, работающие на износ, получили широкое распространение в машиностроении и приборостроении. Основными требованиями, предъявляемыми к этим деталям, наряду с высокой прочностью являются высокая твердость, износостойкость и сравнительно низкий коэффициент трения.

Повышение прочностных характеристик металлокерамических конструкционных материалов осуществляется путем соответствующего легирования железной основы сплава. Одной из наиболее распространенных легирующих добавок является хром.

Легирование углеродистой металлокерамической стали хромом (1%) путем введения в шихту высоколегированных хромосодержащих добавок повышает ее прочность в 1,5...2,0 раза и относительное удлинение в 2...3 раз. При этом более высокая пластичность достигается в сталях, в которые введены менее концентрированные хромосодержащие добавки. Это связано с более равномерным распределением легирующего элемента в металлокерамической стали [1-3].

В последнее время появилось большое количество сложнелегированных антифрикционных сплавов на железной основе. Составы некоторых из них характеризуются данными табл. 1.

Таблица 1

Составы некоторых сложнелегированных антифрикционных материалов
на основе железа [4]

N сплава	Массовая доля, %				
	C	Cr	Ni	Mo	Другие элементы
1	0	5...10	0	0	$Cu \leq 40$, Sn-3...7
2	0,8...0,9	4...5	0	0	2...5Mo, 0,25...25Si
3	0,8...1,4	1...5	0	0,0...0,25	0,1...0,5Si, 0,1...0,25B
4	0,8...2,0	0	0,4...4,0	0	0,5...5,0Mo, 6...11Co
5	1,0	16...20	0	0	1...2BN
6	5...10	0	0,2...10,0	0,2...10,0	Один или несколько порошков металлов или соединений Cr, Mo, W, Nb, V, Ta, Si, P

Введение тех или иных элементов объясняется стремлением усилить одно из наиболее важных свойств материала. Так, введение хрома преследует цель повысить износостойкость и термическую устойчивость (сплав 1: Fe-5% Cr). Сплав 2: Fe-1%C-16%Cr-1%BN имеет твердость HB более 981 МПа при относительном удлинении 6%, обладает высокой коррозионной стойкостью и может работать при повышенных температурах. Состав Fe-0,6%C -1,4%Ni - 0,5%Mo-6%Co преследует цель повысить стойкость к абразивному износу и теплостойкость до 500 °С [4]. Материал Fe-Cr-Ni-C-MoS₂-Cu обладает высокими эксплуатационными свойствами при трении в режиме самосмазывания, при высоких скоростях скольжения без смазки на воздухе и некоторых агрессивных средах. Высокий уровень свойств металлографитовых материалов позволяет изготавливать из них подшипники и торцевые уплотнения, применяющиеся в различных отраслях машиностроения, при изготовлении деталей электротехнического назначения, для работы при повышенных температурах, для агрегатов текстильной и пищевой промышленности, конвейеров, транспортеров, моторов, газотрубопроводов и других механизмов.

Наиболее высоким уровнем эксплуатационных и технологических характеристик обладают материалы на основе железа (табл. 2) [5].

Таблица 2

Исходные компоненты композиционных материалов

Состав сплавов	Содержимое компонентов, %				
N	Cr	Mo	C	Ni	Fe
1. (40X)	1,0	-	0,4	-	остальное
2. (40XH)	0,6	-	0,4	1,5	-"
3. (35XM)	1,0	0,5	0,35	-	-"
4. (40XHM)	1,0	0,5	0,4	1,5	-"
5. (HM)	-	0,5	1	1,5	-"

В тяжелых условиях работы ($P=8...10$ МПа и $V_c=3...4$ м/с) присутствие смазки не всегда эффективно, так как наступает граничное трение. Для улучшения свойств в этом случае прибегают к введению веществ, играющих роль твердой смазки. Присутствие серы

понижает износ пористого железа в тяжелых режимах нагружения почти в 5 раз. Для обеспечения узлов трения, работающих при повышенных давлениях и скоростях трения, применяют сложнолегированные упрочненные материалы (табл.2) $\langle \text{FeCr} + \text{K}^\circ \rangle$ при содержании Cr и K° (Cu, Ni, Mo, MoS_2) в интервале 0,5 ... 5,0%. Дополнительное легирование медью, углеродом, серой и другими металлами осуществляется путем механического смешивания компонентов, т.е. изготовлением шихты [5]. Технологический процесс получения вышеуказанных композиционных материалов приведен в [6]. Он включает изготовление шихты, прессование (с предварительной пористостью $\theta = 15 \dots 20\%$), спекание (гомогенизация матричного материала) и горячую экструзию до обеспечения беспористой структуры (рис.1).

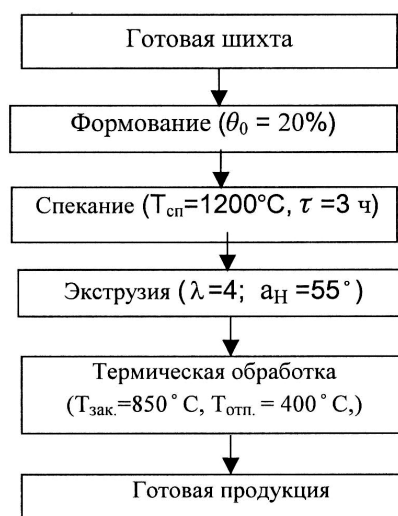


Рис.1. Технологическая схема получения композиционного материала [2]

Испытания на трение и износ экструдированных антифрикционных порошковых композиционных материалов с содержанием Fe-1%Cr-1,5%Ni-0,5%C-3%Cu-4%MoS₂ были проведены на приборе МИ-1М со скоростью вращения $V=1$ м/с при условиях нагрузки 2,0...40 МПа.

Режимы испытания: трение скольжения; удельное давление 1...10 МПа; продолжительность – 1...3 ч; температура – комнатная; время обработки – 1 ч. После длительной восьмичасовой обработки на эксплуатационном образце наряду с увеличением значений нагрузки активизируется образование вторичной структуры [FeNi], [NiMo], [FeMo, Fe₂Mo], а также FeCr или Fe₃₆Cr₁₂Mo₁₀, наличие которых, в частности, подтверждают рентгеновские исследования (рис.2).

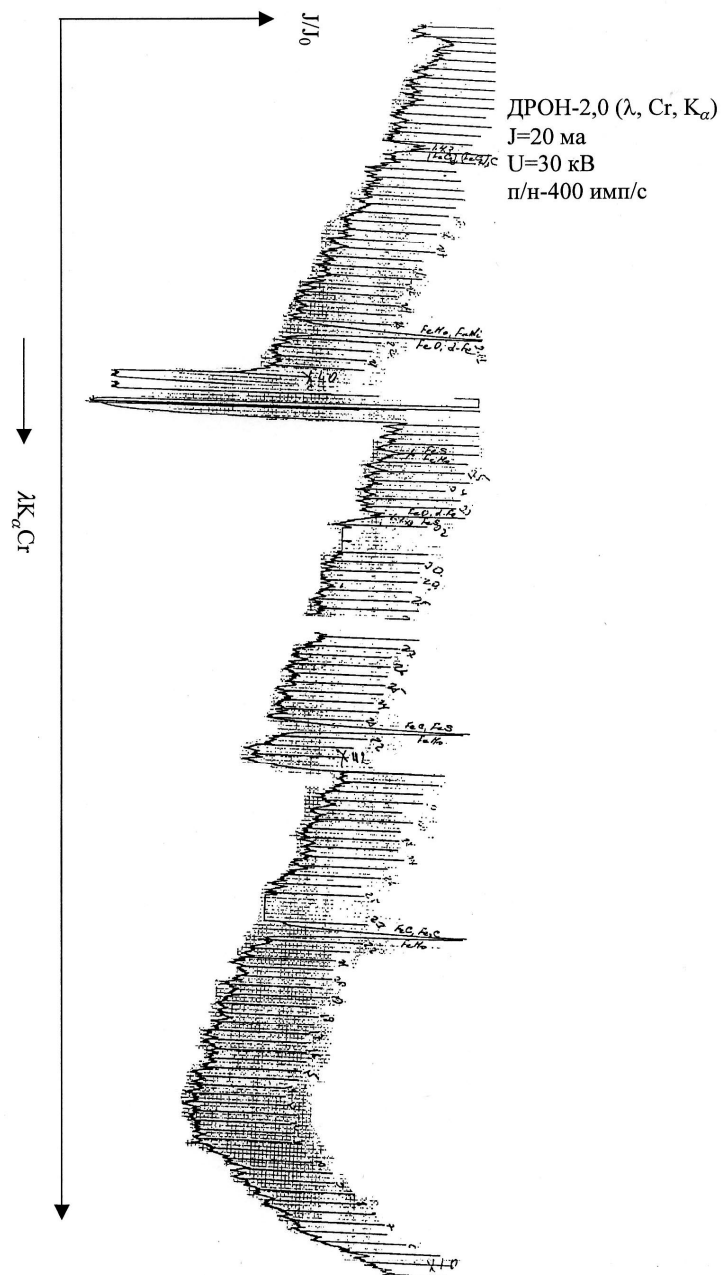


Рис.2. Рентгенографический анализ композиционного материала <Fe-Cr-Ni-Cu-C-MoS₂>

Рентгеновские исследования рабочих поверхностных слоев и продуктов износа материала показали, что легирование молибденом и хромом обеспечивает формирование на поверхности контртела равномерно распределенных мелких участков пленок, состоящих из окислов железа, молибдена и хрома. В процессе трения светлые карбидные участки высокой микротвердости выступают над поверхностью, полируются, образуя участки высокой чистоты, возвышающиеся над основной поверхностью, микротвердость которой равна 7000...7500 МПа, и воспринимают тангенциальные усилия. Микрорельеф этих участков и низкая склонность к адгезионному взаимодействию с поверхностью контртел обуславливают низкий коэффициент трения и пониженную склонность к наволакиванию материала образцов и продуктов износа на поверхность контртела.

Антифрикционные свойства и износостойкость при легировании железа улучшают комплексом добавок: 0,4...0,9% С, 1,0...5,0 % Cr, 2,0...5,0% Мо, 0,2...2,0 % Ni, которые обладают высоким сопротивлением износу при повышенных температурах (до 400...450 °С) [4].

Воздействие вышеуказанных элементов выявляется после термической обработки сплавов (температура закалки - 850°С; отпуск при 400 °С, охлаждение в масле). При сравнении микроструктур спеченных и экструдированных образцов выясняется, что структурообразование начинается при спекании и в процессе экструдирования особенных изменений в структуре не происходит (рис. 3, 4).

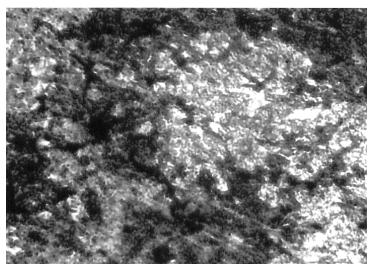
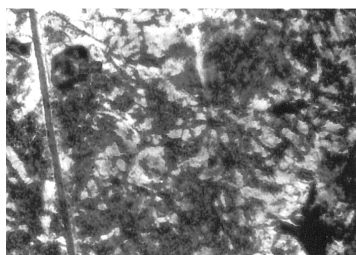


Рис.3. Микроструктура спеченного композиционного материала FeCr-Ni-Mo-C (Т_{сл}=1200 °С, τ = 3 ч) (х 400)



а)



б)

Рис.4. Микроструктура спеченного композиционного материала Fe-Cr-Mo-C: а - после экструзии (Т_{экс}=1100°С, λ=4); б - тот же состав после термообработки (Т_{зак} = 850°С; отпуск 400°С) (х 400)

Фазовый состав после спекания: неоднородный твердый раствор Ni, Cr и Mo в железе, перлит, светлые включения карбидной фазы (Mo_2C , Cr_3C_2), $(\text{FeCr}_7)\text{C}_3$ и интерметаллиды (Fe_2Mo , FeMo , FeCr и др.).

На рис.4 а показана микроструктура экструдированных образцов, представляющая собой легированный феррохром, феррит и мартенситоподобный перлит. На снимках хорошо видна карбидная фаза.

Некоторые образцы после экструзии немедленно закаливали. Высокая износостойкость материала объясняется его существенно неравновесной структурой, которая представляет собой железоуглеродистую матрицу (мартенситную основу с распределенными в ней твердыми частицами карбидов $(\text{FeCr}_7)\text{C}_3$, окруженными зонами диффузии хрома и молибдена). Микротвердость карбидов составляет 18000...20000 МПа, а микротвердость мартенсита и зон диффузии – 7500 МПа (рис. 4б).

Экспериментальные исследования трения и износа показывают, что минимальный износ наблюдается в условиях нагружения $P=12$ МПа, когда коэффициент трения составляет $\mu=0,061$, а при $P=36$ МПа – $\mu=0,032$ (рис.5).

Эти значения превышают аналогичные значения беспористого порошкового композита $\langle \text{Fe}-5\%\text{Mo}-2\%\text{Cu}-2\%\text{MoS}_2-0,5\%\text{C} \rangle$ ($\mu=0,08...0,1$ и $j=0,025...0,034$ г/км), что практически достижимо для материалов антифрикционного назначения, работающих в условиях сухого трения [5].

С точки зрения совместимости трущихся пар, важное значение имеет весовое соотношение $j_{\text{км}}/j_{\text{контр}}$ (рис.5).

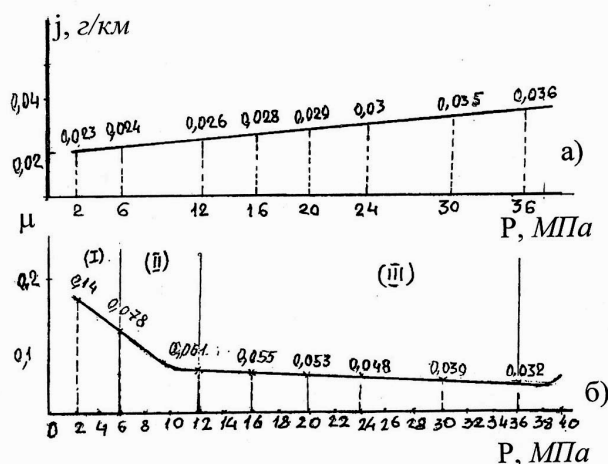


Рис. 5. Зависимости износа и коэффициента трения от нагрузки для непористых материалов

Состав:
 $\langle \text{Fe}-1\%\text{Cr}-1,5\%\text{Ni}-3\%\text{Cu}-0,5\%\text{C}-4\%\text{MoS}_2 \rangle$

На рис. 5 а и б приведены зависимости коэффициентов износа I г/км и трения μ от нагрузки P . Здесь выделены 3 характерные зоны: 1- инкубационная или переходная; 2 - стационарная, которая соответствует нормальным режимам работы узла трения; 3 – зона изнашивания. Согласно рис. 5, рабочий оптимальный режим композиционного материала находится в интервале давления $P=12...40$ МПа, в течение которого значения коэффициентов трения и износа изменяются в пределах $\mu=0,061...0,032$ и $j=0,026...0,036$ г/км.

Известно, что особое воздействие на параметры антифрикционного назначения пары трения имеют характер и свойства возникаемых вторичных структур. Вторичное структурообразование является следствием механохимического легирования (взаимодействие) поверхностного слоя, включая дисперсию материалов (окиси, сульфиды, карбиды и др. соединения) на поверхностях трения (рис.2). Отмеченные материалы образуются в условиях температуры спекания и трения при высоких давлениях, где они приобретают новое качество (характеристики и структуру), в результате чего композиционный материал приобретает высокие механические свойства ($\sigma_B = 1200 \text{ МН/м}^2$, $\delta = 13\%$, $\psi = 35\%$, $KCU = 590 \text{ кДж/м}^2$), как, например, при дисперсном затвердевании.

Роль вторичного структурообразования заключается в локализации адгезионно-деформационных процессов, в результате чего образуется тонкий рабочий слой с низкой прочностью скольжения (рис.2).

Образовавшийся в сплаве сульфид молибдена MoS_x ($x \cong 1,8$) по своей кристаллической структуре близок к MoS_2 , что обеспечивает антифрикционные свойства данного порошкового композиционного материала. Полученный порошковый сплав по антифрикционным свойствам с учетом зависимостей J и μ от давления P (рис. 5 а, б) работоспособен в условиях нагрузки до 40 МПа.

Механические и антифрикционные свойства порошкового материала обусловлены процентным содержанием компонентов (Fe, Mo, Cr, Cu, Ni, C, MoS_2), оптимизация значений которых проводилась со сплавом Fe-1%Cr-1,5%Ni-0,5%C-3%Cu-4% MoS_2 . Образцы были изготовлены по технологии [2].

Степень воздействия основных факторов на свойства сплава, полученного экструзией, выявлена методом планирования фактического эксперимента типа 2^6 . Исследована зависимость параметров, при которой обеспечивается максимальная прочность порошкового композиционного материала:

$$\sigma_B = \frac{e^{6,63} \cdot \text{Cr}^{0,32} \cdot \text{Fe}^{0,11} \cdot \text{C}^{0,25}}{\text{MoS}_2^{0,012} \cdot \text{Cu}^{0,036} \cdot \text{Ni}^{0,54}}.$$

На рис.6 приведены зависимости значений прочности от определяющих факторов: функция $\sigma_B = f(\text{Cr}, \text{C}, \text{Fe})$ - гиперболически возрастающая, а $\sigma_B = f(\text{Cu}, \text{MoS}_2, \text{Ni})$ - гиперболически убывающая. По графику можно определить те оптимальные значения исследуемых параметров, при которых обеспечиваются механические свойства порошкового композиционного материала, а именно: Cr (2,0%), C (0,5%), Cu (2,0%) и MoS_2 (1,0%), Ni (1,0%), остальное - Fe: Механические свойства отмеченного материала следующие: $\sigma_B = 1200 \text{ МН/м}^2$, $HV = 3000 \text{ МПа}$, $KCU = 590 \text{ кДж/м}^2$.

По своим антифрикционным свойствам эти композиции допустимы для подшипниковых деталей, работающих в условиях тяжелых нагрузок ($\mu = 0,032$ и $P = 40 \text{ МПа}$, $V = 1 \text{ м/с}$).

Шаг для каждого фактора:

Cr → 0,5; 1,0; 1,5; 2,0	$\Delta Cr = 0,5$
Ni → 1,0; 1,5; 2,0	$\Delta Ni = 0,5$
Fe → 50; 75; 100	$\Delta Fe = 25$
C → 0,5; 0,6; 0,7; 0,8	$\Delta C = 0,1$
Cu → 1,0; 2,0; 3,0	$\Delta Cu = 1,0$
Ni → 1,0; 1,5; 2,0	$\Delta Ni = 0,5$
MoS ₂ → 1,0; 1,5; 2,0; 2,5	$\Delta MoS_2 = 0,5$

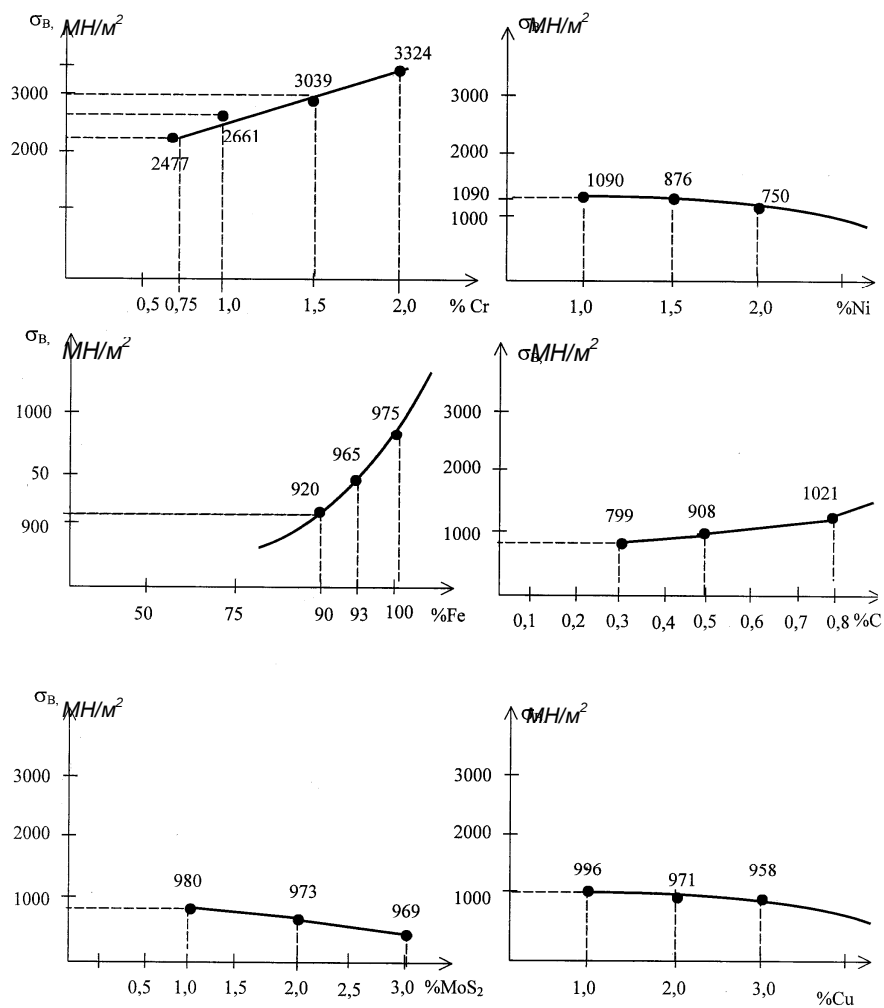


Рис.6. Зависимость значений прочности от определяющих факторов: функция $\sigma_B = f(Cr, C, Fe)$ - гиперболически возрастающая, $\sigma_B = f(Cu, MoS_2, Ni)$ - гиперболически убывающая

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Манукян Н.В., Мнацаканян С.А.** Расширенные тезисы докладов VI Республиканского семинара по порошковой металлургии. - Таллин, 1970. - С.21-24.
2. **Петросян А.С., Африкян Т.Г.** Порошковые железохромистые износостойкие материалы // Заготовительные производства в машиностроении. - М., 2006. - № 6. - С. 38-40.
3. **Радомысельский И.Д.** Металлокерамические конструкционные детали // Порошковая металлургия. - 2002. - № 9/10.
4. Порошковая металлургия / Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник. - Киев: Наукова думка, 1985. - 624 с.
5. **Петросян А.С., Туманян Г.А., Гукасян В.С., Амбарцумян Э.Г.** Структурообразование в порошковых многокомпонентных системах в процессе горячей экструзии // Вестник Инженерной академии Армении. - 2007. - Т.4, № 1. - С. 85-88.
6. **Петросян А.С., Саркисян Ш.Э., Казарян А.Н., Амбарцумян Э.Г.** Разработка технологии получения композиционных материалов на основе Fe-Mo-Cu // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2004. - Т.57, № 3. - С. 393-399.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 11.03.2008.

Հ.Ս. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Գ.Ա. ԹՈՒՄԱՆՅԱՆ, Վ.Ս. ՂՈՒԿԱՍՅԱՆ ՓՈՇԵՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ՄԱՇԿԱՅՈՒՆ ԿՈՆՍՏՐՈՒԿՏԻՈՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ ԵՎ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱԳՈՅԱՑՈՒՄ

Մշակվել է հակաշփական նշանակության <Fe-Cr> մայրակով փոշեկոմպոզիցիոն նյութերի ստացման տեխնոլոգիա: Հիմքում ունենալով ամրացման պինդ լուծույթային Fe[Ni], Ni[Mo], Fe[Mo] և ինտերմետաղական [FeCr, Fe₃₆Cr₁₂Mo₁₀, Fe₂Mo] մեխանիզմները և <Fe-Cr> մայրակին ավելացնելով պինդ յուղիչներ (C, MoS₂), ստացվում են չոր շփման պայմաններում աշխատող հակաշփական հատկություններով ($\mu = 0,032$ և $i = 0,036$ գր/կմ) փոշեկոմպոզիցիոն նյութեր: Տրված են այդ նյութերի ֆիզիկամեխանիկական հատկությունները և միկրոկառուցվածքային վերլուծության արդյունքները:

Առանցքային բաներ. արտամղում, կոմպոզիցիոն նյութ, մեխանիկական և հակաշփական հատկություններ, միկրոկառուցվածքային վերլուծություն:

H.S. PETROSYAN, G.A. TUMANYAN, V.S. GHUKASYAN OBTAINING OF POWDER COMPOSITE MATERIAL TECHNOLOGY WITH ANTIFRICTION PURPOSE BASED ON Fe-Cr PROPERTIES AND STRUCTURAL FORMING

Obtaining of powder composite material technology with antifriction purpose based on the matrix "Fe-Cr" is developed. Based on solvent Fe[Ni], Ni[Mo], Fe[Mo] and intermetalloid [FeCr, Fe₃₆Cr₁₂Mo₁₀, Fe₂Mo] mechanism by adding solid lubrications (C, MoS₂) the powder composite materials of antifriction purpose ($\mu = 0,032$ and $i = 0,036$ gr/km) operating in dry friction conditions are obtained. Mechanical, tribotechnical properties and microstructure analysis of composite antifriction are given.

Keywords: extrusion, composite materials, mechanical and antifriction properties, microstructure analysis.

А.В. ТАДЕВОСЯН, А.Ф. АМБАРЦУМЯН, А.Р. СУКИАСЯН,
А.А. КИРАКОСЯН, А.Г. ШАМИАН

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

На основании способности растений аккумулировать химические элементы, в частности элементы 3d-группы периодической системы, создан достоверный экспресс-метод диагностики и прогноза экологической ситуации.

Ключевые слова: тяжелые металлы, растение, экспресс-метод диагностики и прогноза экологической ситуации.

Токсичность ряда тяжелых металлов (ТМ), их участие в биогеохимических процессах и их значительный антропогенный приток в окружающую среду обусловили ведущее место ТМ среди загрязняющих веществ, подлежащих наблюдению и контролю [1].

Важное методологическое значение для организации системы мониторинга состояния окружающей среды имеют результаты исследований биоиндикации, переноса вредных веществ, а также их перераспределения между средами [2,3].

Растения способны аккумулировать химические элементы и дать соответствующий отклик, что отражается в изменениях на макро- и микро-уровнях. Используя индикационное свойство растений, возможно их использование для исследования степени загрязненности окружающей среды антропогенными выбросами [4,5].

Целью данной работы является создание достоверного экспресс-метода диагностики и прогноза экологической ситуации, основанного на свойстве некоторых растений аккумулировать ТМ.

В качестве объекта исследования были использованы многолетние растения зверобоя продырявленного (*Hypericum Perforatum*), крапивы двудомной (*Urtica dioica*), полыни горькой (*Artemisia Absinthium*), чистотела большого (*Chelidonium Majus*), шалфея (*Salvia Officinalis*). Данные растения были собраны в местах их естественного произрастания. Содержание элементов 3d-группы периодической системы (Co, V, Mn, Mo, Ni) в растительном образце определялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии после сухого озоления. Полученные результаты сравнивались с имеющимися литературными данными для растений со сходными условиями произрастания [6]. Изменения интенсивности свечения осуществлялись на хемилюминесцентной установке [7]. Результаты были обработаны с помощью программы MatLab с учетом критерия Стьюдента [8].

Ионы 3d-металлов, поступающие в гидросферу со стоками промышленных предприятий, накапливаются в растениях, в частности, в тех, которые послужили объектом исследований.

Обладая переменной валентностью, эти ионы участвуют в окислительных процессах липидсодержащих структур растений. При этом реакции

свободнорадикального окисления могут протекать без участия ионов переменной валентности и сопровождаются сверхслабым свечением [9, 10].

Исходя из этого, были приготовлены диметилформамидные (ДМФА) препараты растений, что позволяло получать их спирторастворимые и водорастворимые составляющие в одном экстракте. На рис. 1а,б представлены кинетические кривые сверхслабого неиндуцированного свечения экстрактов растений.

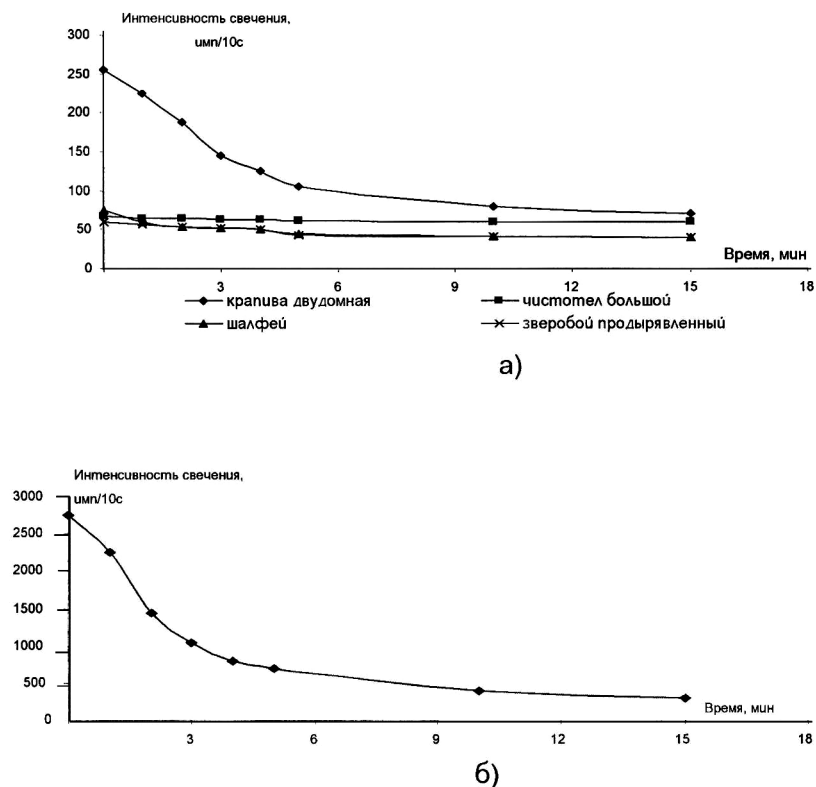


Рис. 1. Кинетическая кривая сверхслабого неиндуцированного свечения: а - экстрактов растений, б - полыни горькой

Следует отметить, что среди опытных образцов экстракт полыни горькой обладал самым высоким уровнем свечения, превышающим фоновое значение установки (30 ± 4 имп/10с) на два порядка. Остальные препараты обладали более умеренной интенсивностью свечения. При этом увеличение концентрации экстракта растений сопровождалось повышением интенсивности хемилюминесцентного свечения с определенным коэффициентом пропорциональности для образцов (рис. 2 а,б)

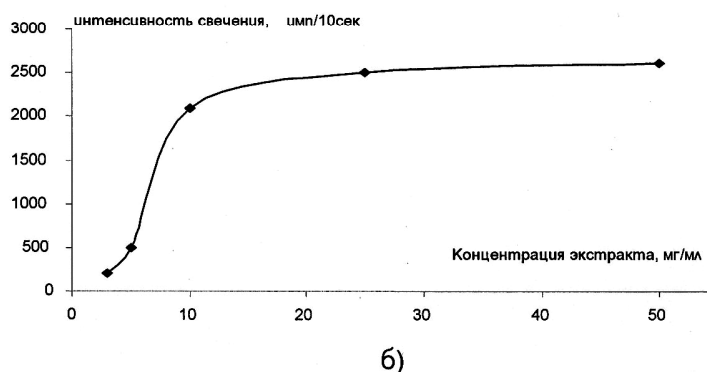
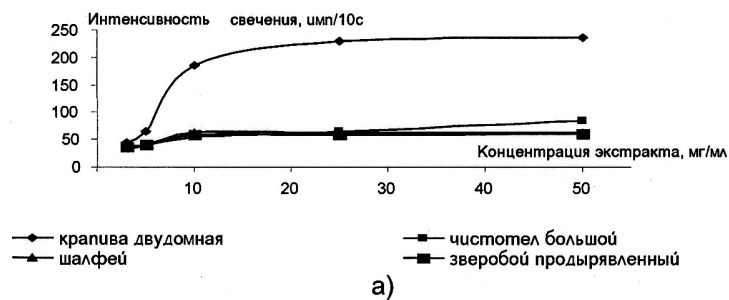


Рис. 2. Зависимость свечения от концентрации: а - образцов, б - экстракта полыни горькой

Далее было определено суммарное значение определенных микроэлементов в образцах. Анализ и сопоставление полученных результатов позволили обнаружить корреляционную связь между интенсивностью свечения и суммарным содержанием Zn -ионов. Оказалось, что уровень свечения ДМФА-препаратов исследуемых образцов растений (I) линейно коррелирует с суммарным содержанием (C^*) ионов Co , V , Mn , Mo и Ni (рис. 3).

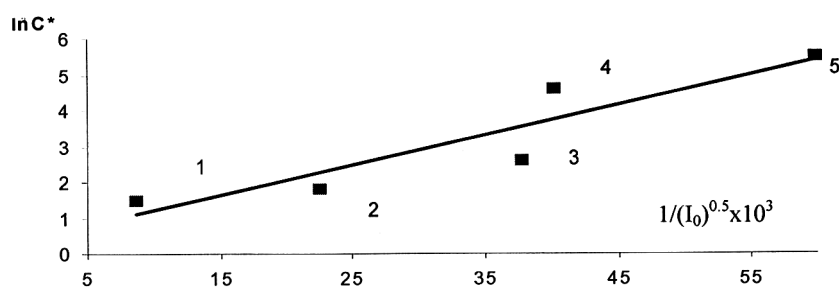


Рис.3. Зависимость логарифмической суммы содержания ионов V , Mn , Mo , Ni и Co ($\ln C^*$; $мкг/г$) от обратной величины интенсивности $CC(1/\sqrt{I_0})$, где 1- полынь горькая, 2 - зверобой продырявленный, 3 - чистотел большой, 4 - шалфей лекарственный, 5 - крапива двудомная

Однако полученные статистические параметры заметно ухудшаются, если в C^* включить также содержание других d-элементов: Zn, Cu и Cr (см. табл.). Вероятно, наличие неспаренного 4s-электрона у Cu и Cr ограничивает их участие в промотировании перекисного окисления липидсодержащих структур. Участие Zn в процессах окисления объясняется тем, что, обладая завершённой электронной структурой, данный ион не способен к реакции промотирования распада перекисей. Несмотря на активное участие Fe в названных реакциях, предлагается не включать его концентрацию в сумму C^* , поскольку он содержится не в микроколичествах, как вышеперечисленные ионы ТМ, а относится к макроэлементам с концентрацией, превышающей 1 мг/г.

Таблица

Статистические параметры (коэффициент корреляции, нулевой и первый полиномиальные коэффициенты) линейной связи $\ln C = a_0/\sqrt{I_0} + a_1$, где C - суммарная концентрация ионов d-металлов в мг/г; I_0 - интенсивность свечения ДМФА-экстрактов в начальный момент времени (при $P=0.01$; $f=3$), использована нумерация по рис. 3

LnC	1	2	3	4	5	a_0	a_1	R^2
C^*	1,5	1,8	2,6	4,6	5,5	0,0837	0,3722	0,8403
C^*+C_{Cr}	1,53	1,82	2,63	5,11	5,52	0,0819	0,2734	0,5742
C^*+C_{Cu}	1,63	1,88	2,70	4,77	5,52	0,0822	0,5211	0,8251
C^*+C_{Zn}	1,65	1,94	2,70	5,30	5,52	0,0837	0,5928	0,7602
$C^*+C_{Cr}+C_{Cu}$	1,63	1,89	2,72	5,31	5,52	0,0845	0,5574	0,7623
$C^*+C_{Cr}+C_{Zn}$	1,67	1,94	2,72	5,31	5,52	0,0835	0,6109	0,7593
$C^*+C_{Cu}+C_{Zn}$	1,74	1,99	2,79	5,38	5,52	0,0824	0,6990	0,7525
$C^*+C_{Cu}+C_{Zn}+C_{Cr}$	1,74	1,99	2,81	5,39	5,52	0,0825	0,7018	0,7537

Таким образом, с увеличением концентрации ионов d-элементов в изучаемых растениях интенсивность сверхслабого свечения их экстрактов линейно уменьшается. Обнаруженная зависимость позволяет по интенсивности хемилюминесценции определять суммарную концентрацию ионов ТМ в растениях-биоиндикаторах, что упрощает проведение мониторинга степени загрязнения водоемов и грунтовых вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михева Е.В., Жигальский О.А., Мамина В.П. Тяжелые металлы в системе почва-растение-животное в районе естественной геохимической аномалии // Экология. - 2003.- № 4. - С. 318-320.
2. Тадевосян А.В., Хачатрян Л.Р., Агабалова А.П., Айрян Л.Ш., Саядян А.А. Производственная надежность как критерий экологического риска // Сборник тезисов НАН РА. - 2000. - С. 90.

3. **Тадевосян А.В., Агабалова А.П.** Метод оценки потенциальной опасности химико-технологического объекта // Вест. Межд. Академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности.- СПб, 2002.- Т.7, № 4(552). – С. 72-74.
4. **Корнеева Г.А.** Биохимическая (ферментативная) индексация и тестирование экологического состояния гидросфере // Известия АН. Серия биологическая. - 2002.- №1. - С. 51-54.
5. **Неверова О.А.** Биоэкологическая оценка загрязнения атмосферного воздуха по состоянию древесных растений.- Новосибирск: Наука, 2001.- 119 с.
6. Химический анализ лекарственных растений / Под ред. **Н.И. Гринкевича, Л.М. Сафронича.** - М.: Высшая школа, 1983.- 176с.
7. **Закарян А.Е., Цагикян А.Р., Погосян Г.А., Паносян Г.А.** Установка для регистрации сверхслабой хемилюминесценции // Биологический журнал Армении.-1992.- Т 43, № 1.- С. 51-54.
8. **Сукиасян А.Р., Киракосян А.А.** Использование языка MatLab в качестве экспресс- метода оценки экспериментальных результатов // Информационные технологии: Сборник материалов Международной молодежной конференции. – Ереван, 2005. – С. 34 - 37.
9. **Эмануэль Н.М., Зайков Г.Е., Майзус З.К.** Роль среды в радикально-цепных реакциях окисления органических соединений.- М.: Наука, 1973. – 246 с.
10. **Владимиров Ю.А., Арчаков А.И.** Перекисное окисление липидов в биологических мембранах. - М.: Наука, 1972. – 252 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 17.10.2007.

**Ա.Վ. ԹԱԴԵՎՈՍՅԱՆ, Ա.Ֆ. ՀԱՄԲԱՐՏՈՒՄՅԱՆ, Ա.Ր. ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ,
Ա.Ա. ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ, Ա.Գ. ՇԱՄԻՅԱՆ**

ԾԱՆՐ ՄԵՏԱՂՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՃԵՊԸՆԹԱՅ ԵՂԱՆԱԿ

Հիմնվելով բույսերի քիմիական տարրեր, մասնավորապես պարբերական համակարգի 3d-խմբի տարրեր, կուտակելու ունակության վրա ստեղծված է բնապահպանական իրավիճակի կանխատեսման և կանխարգելման արժանահավատ ճեպընթաց եղանակ:

Առանցքային բառեր. ծանր մետաղներ, բույսեր, կանխատեսման և կանխարգելման արժանահավատ ճեպընթաց եղանակ:

**A.V. TADEVOSYAN, A.F. HAMBARTSUMYAN, A.R. SUKIASYAN,
A.A. KIRAKOSYAN, A.G. SHAMIYAN**

EXPRESS-METHOD OF HEAVY METAL DIAGNOSTICS

Based on ability of plants to accumulate chemical elements, in particular, elements of the 3d-group of periodic system, the authentic express method of diagnostics and the prognosis of an ecological situation are created.

Keywords: heavy metal, plants, extra light flourence.

Լ.Ե. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Ա.Ա. ԱՂԱՅԱՆ

ՏԵՂԱԿԱՆ ԱՌԱՋՆԱՅԻՆ ԿԱՊԱՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱՉՏՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Հետազոտված են տեղական կապարատար խտանյութի պիրո-հիդրո-մետալուրգիական վերամշակմամբ կորզված առաջնային կապարի էլեկտրագտման գործընթացի տեխնոլոգիական պարամետրերը: Ցույց է տրված, որ ստացված կապարն իր մաքրությամբ չի զիջում գործող ստանդարտներին:

Առանցքային բառեր. բազմամետաղ, խտանյութեր, էլեկտրառաֆինացում, էլեկտրոլիտ, անոդային:

Սովորաբար կիսամաքուր կապարի ռաֆինացման համար որպես էլեկտրոլիտ կարող են ծառայել հեքսաֆտորասիլիցիումային կապարատի ($\text{Pb}[\text{SiF}_6]$) և ֆտորսիլիցիումաջրածնական թթվի ($\text{H}_2[\text{SiF}_6]$) ջրային լուծույթը, բորաֆտորային կապարի ($\text{Pb}(\text{BF}_4)_2$) և բորֆտորաջրածնական թթվի ($\text{H}[\text{BF}_4]$) լուծույթը, ֆենոլսուլֆոնային, գերքլորատային և սուլֆամինային լուծույթները [1]:

Թվարկված լուծույթներից առավել նպատակահարմարը սիլիցիումֆտորաջրածնական էլեկտրոլիտն է ($\text{H}_2[\text{SiF}_6]$ թթվի և $\text{Pb}[\text{SiF}_6]$ միացության ջրային լուծույթը), որն օժտված է բարձր էլեկտրահաղորդականությամբ և առաջացնում է կապարի լավ լուծելի աղեր:

Հետազոտությունների համար օգտագործվելիք էլեկտրոլիտը ($65\ldots 90$ գ/լ $\text{Pb} \cdot \text{Pb}[\text{SiF}_6]$ – ի տեսքով և $70\ldots 95$ գ/լ ազատ $\text{H}_2[\text{SiF}_6]$) պատրաստվել է տեղում: Սկզբում դաշտային շպատի փոշին (հիմնականում՝ CaF_2) մշակվել է խիտ ծծմբական թթվով, որի հետևանքով ստացված ֆտորաջրածնային թթուն (HF), փոխազդելով ջրային միջավայրում քվարցի փոշու հետ (SiO_2), գոյացնում է հեքսաֆտորսիլիցիումային կապարի լուծույթ ($\text{H}_2[\text{SiF}_6] + 2\text{H}_2\text{O}$): Անհրաժեշտ բաղադրության լուծույթն ստացվում է վերջինիս՝ մաքուր կապարով հագեցմամբ:

Արտադրական փորձից ելնելով՝ խիտ և հարթ կաթոդային նստվածք ստանալու համար էլեկտրոլիտի մեջ հավելվել է սոսինձ և «գուլակ» (սուլֆատ – ցելյուլոզային արտադրության արգասիք), այն հաշվով, որ մեկ կգ կապարի գտման համար սոսնձի ծախսը կազմի $0,2\ldots 0,4$ գ, իսկ գուլակինը՝ $0,4\ldots 0,8$ գ:

Անոդային սալիկները ռաֆինացվել են վաննայում՝ հարթ – զուգահեռ տեղակայմամբ: Որպես կաթոդային հիմքեր օգտագործվել են մաքուր էլեկտրոլիտային կապարե թերթիկները:

Ուսումնասիրությունները կատարվել են հանքային բազմամետաղային հումքից ստացված կիսամաքուր կապարի համար [2]:

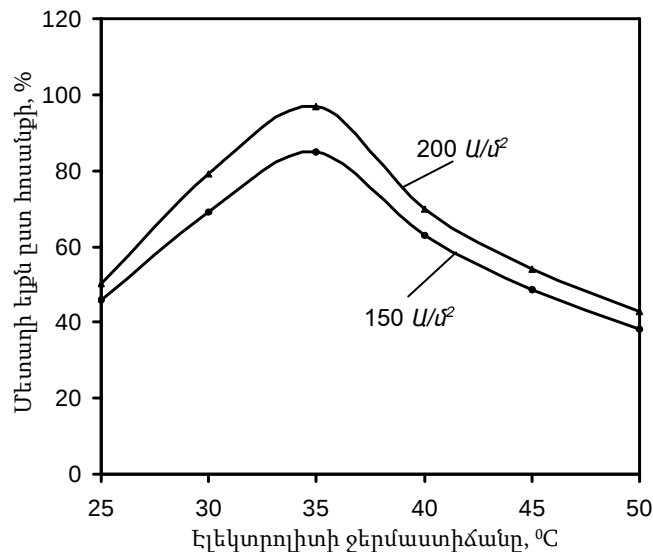
Գործընթացը հետազոտվել է՝ կախված հոսանքի խտությունից ($150\ldots 225$ Ա/մ² սահմաններում), էլեկտրոլիտի ջերմաստիճանից ($25\ldots 50$ °C տիրույթում), կաթոդի և անոդի հեռավորությունից ($15\ldots 65$ մմ՝ աշխատանքային ճակատների միջև) և

Էլեկտրոլիզի տևողությունից (1...3 ժամ): Բոլոր դեպքերում որպես վերահսկվող պարամետր է ընտրվել մետաղի ելքն ըստ հոսանքի:

Փորձի տվյալներից երևում է, որ հոսանքի խտության բարձրացումը չափավոր ձևով մեծացնում է մետաղի ելքն ըստ հոսանքի: Դա հատկապես նկատելի է 200...225 $Ա/ս^2$ տիրույթում:

Գրաֆիկներից (նկ. 1) հստակորեն երևում է էլեկտրոլիտի ջերմաստիճանի դրական ազդեցությունը մետաղի ելքի վրա ըստ հոսանքի, 25 - ից մինչև 35 °C սահմաններում: 35 °C ջերմաստիճանից ավելի բարձր ջերմաստիճաններում մետաղի ելքն ըստ հոսանքի աստիճանաբար նվազում է և արդեն 50 °C - ի դեպքում դառնում ավելի փոքր, քան նույնիսկ 25 °C - ում: Ակնհայտ է, որ ջերմաստիճանի բարձրացումը նպաստում է մետաղի ելքին, որովհետև, մնացած հավասար պայմանների դեպքում, բարձր ջերմաստիճաններում արագանում է իոն-ների դիֆուզիան էլեկտրոլիտի ներսում: Սակայն փորձը ցույց է տալիս, որ 35 °C - ից բարձր ջերմաստիճաններում մեկ ժամ էլեկտրոլիզից հետո զգալի չափով նվազում է թթվի կոնցենտրացիան էլեկտրոլիտում, ինչը, հավանաբար, կապարի կատիոնների էլեկտրավերականգնման արագության նվազման հետևանք է, հետևապես նաև փոքրանում է մետաղի ելքն ըստ հոսանքի: Ուստի արտադրական պայմանների համար հանձնարարելի է 30...40 °C ջերմաստիճանը:

Բերված գրաֆիկներից երևում է նաև, որ միևնույն ջերմաստիճանում որքան բարձր է հոսանքի խտությունը, այնքան մեծ է մետաղի ելքն ըստ հոսանքի:

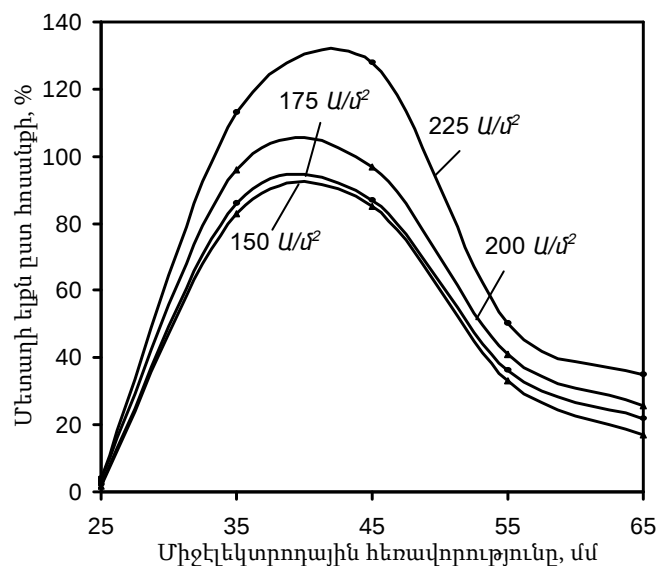


Նկ. 1. Առաջնային կապարի ռաֆինացման դեպքում մետաղի ելքն ըստ հոսանքի՝ կախված էլեկտրոլիտի ջերմաստիճանից, հոսանքի տարբեր խտությունների և էլեկտրոլիզի 1 ժամ պայմաններում

Բերված կախվածություններից (նկ. 2) հետևում է, որ մետաղի ելքն ըստ հոսանքի առավել զգայուն է միջէլեկտրոդային հեռավորության նկատմամբ, ինչը հատկապես ակնհայտ է 30...50 մմ հեռավորությունների դեպքում: Այդ դեպքում նույնպես հոսանքի խտության ավելացումը զգալիորեն մեծացնում է մետաղի ելքն ըստ հոսանքի:

Ըստ հոսանքի մետաղի ելքի կտրուկ մեծացում է նկատվում, երբ հոսանքը փոփոխվում է 200...225 Ա/մ² սահմաններում: Մետաղի ելքն ըստ հոսանքի նվազում է էլեկտրոլիզի տևողությունը 1...3 ժամ մեծացնելիս, որը բացատրվում է ժամանակի ընթացքում անոդի մակերևույթին առաջացող շլամային շերտի աճով:

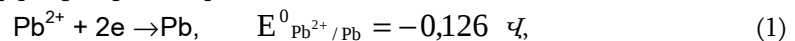
Մետաղի ելքն ըստ հոսանքի ցածր է ինչպես միջէլեկտրոդային հեռավորության փոքր (մինչև 25...27 մմ), այնպես էլ չափից դուրս մեծ չափերի (> 50 մմ) դեպքում: Փոքր հեռավորությունների դեպքում տեղի է ունենում հոսանքի անհավասարաչափ բաշխում էլեկտրոդների մակերեսին, իսկ մեծ հեռավորությունների դեպքում, ակնհայտորեն, թույլ է էլեկտրական դաշտի լարվածությունը, ինչի հետևանքով նվազում է լիցքավորված մասնիկների շարժման արագությունը:



Նկ. 2. Առաջնային կապարի ռաֆինացման դեպքում մետաղի ելքն ըստ հոսանքի՝ կախված կաթոդի և անոդի միջև հեռավորությունից, հոսանքի տարբեր խտությունների պայմաններում, էլեկտրոլիզի 1 ժամ տևողությամբ

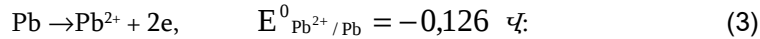
Հոսանքի մեծ խտությունների պայմաններում 100 % – ից ավելի մետաղի ելքն ըստ հոսանքի բացատրվում է կապարի լրացուցիչ քանակի էլեկտրավերա-կանգնումով՝ ի հաշիվ էլեկտրոլիտում առկա մետաղի իոնների:

Տեսականորեն գործընթացի հիմնական կաթոդային ռեակցիաները կապարի ու ջրածնի կատիոնների վերականգնումներն են՝



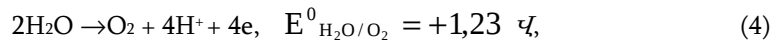
Մակայն կաթոդի վրա առավելապես տեղի է ունենում կապարի էլեկտրավերականգնում: Դա բացատրվում է նրանով, որ կաթոդի վրա բավարար արագությամբ կապարի վերականգնման համար անհրաժեշտ է շատ փոքր բևեռացում ($< 0,1$ Վ), մինչդեռ, ջրածնի իոնների վերականգնման գերլարումը 25°C և 100 Ա/մ^2 հոսանքի խտության պայմաններում կազմում է $1,09$ Վ:

Անոդային հիմնական ռեակցիան կապարի օքսիդացումն է՝



Ջրի օքսիդացումը անոդի վրա թթվածնի անջատումով քիչ հավանական է, քանի որ ռեակցիայի էլեկտրոդային պոտենցիալը զգալի չափով գերազանցում է անոդի բևեռացումը ($0,2$ Վ)՝

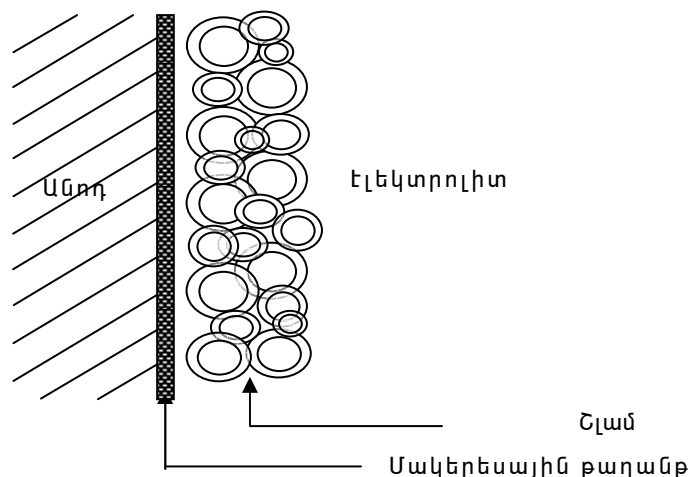
$2\text{H}_2\text{O}$ Ջրի օքսիդացումը անոդի վրա թթվածնի անջատումով քիչ հավանական է, քանի որ ռեակցիայի էլեկտրոդային պոտենցիալը զգալի չափով գերազանցում է անոդի բևեռացումը ($0,2$ Վ)՝



և էլեկտրադրական խառնուրդների էլեկտրոդային պոտենցիալը:

Անոդի ոչ մեծ բևեռացման պայմաններում կապարը տարրալուծվում է բավարար արագությամբ, և էլեկտրադրական խառնուրդները մնում են անոդի մակերևույթին՝ գոյացնելով սպունգաձև շլամ (նկ. 3): Այդ շերտի մեծացումը դժվարացնում է կապարի տարրալուծումը, պայմանավորում է անոդային բևեռացման ավելացումը, պայմաններ է ստեղծում էլեկտրադրական խառնուրդների՝ էլեկտրոլիտի մեջ անցման համար: Այդ պատճառով, որպեսզի ապահովված լինի կաթոդային նստվածքի մաքրությունը, պետք է փոքրացնել անոդային հոսանքի խտությունը (այսինքն՝ կապարի տարրալուծման արագությունը) և շլամային նստվածքի հաստությունը: Վերջինիս համար, ինչպես երևում է գիտափորձի արդյունքներից, անհրաժեշտ է կամ անոդները վաննայում պահել կարճ ժամանակով, կամ պարբերաբար մաքրել դրանց մակերևույթին նստած շլամից:

Արտադրական պայմաններում կիրառելի է անոդների անընդհատ մաքրումը շարժվող խողանակների օգնությամբ:



Նկ. 3. Անոդի մակերևութային շլամային շերտի գոյացման սխեման

Չնայած այս դեպքում որոշ չափով երկարում է օժանդակ ժամանակը, սակայն դա արդարացվում է՝ նկատի ունենալով անոդային պասիվացման հետևանքով գտման գործընթացում անխուսափելի խափանումների կանխումը:

Որպես էլեկտրառաֆինացման օպտիմալ ռեժիմներ են ընտրված.

- էլեկտրոլիտի կազմը՝ $65...90 \text{ գ/լ Pb} \cdot \text{Pb}[\text{SiF}_6]$ – ի տեսքով և $70...95 \text{ գ/լ H}_2[\text{SiF}_6]$,
- միջէլեկտրոդային հեռավորությունը՝ $35...45 \text{ մմ}$,
- էլեկտրոլիտի ջերմաստիճանը՝ $30...40^\circ\text{C}$,
- հոսանքի խտությունը՝ $180...220 \text{ Ա/մ}^2$,
- վաննայի սկզբնական լարումը՝ $0,3...0,4 \text{ Վ}$, որն այնուհետ անոդի
- բևեռացման հաշվին մեծանում է մինչև $0,5...0,6 \text{ Վ}$:

Հաշվարկային էլեկտրաէներգիայի ծախսը՝ $140 \text{ կՎտ}\cdot\text{ժ/տ Pb}$:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Шиврин Г.Н.** Металлургия свинца и цинка.- М.:Металлургия,1982. - 352 с.
2. **Սարգսյան Լ.Ե., Հովհաննիսյան Ա.Մ., Աղայան Ա.Ա.** Սուլֆիդային խտանյութերից կապարի հիդրոմետալուրգիական կորզման տեխնոլոգիայի հետազոտումը // ՀՀ ԳԱԱ և ՀՊՃՀ տեղեկագիր. ՏԳ սերիա.- 2006.- Հատոր LVIII, № 3.- Էջ 463 – 467:

ՀՊՃՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 12.11.2007:

Л.Е. САРГСЯН, А.А. АГАЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОРАФИНИРОВАНИЯ МЕСТНОГО ПЕРВИЧНОГО СВИНЦА

Исследованы технологические параметры процесса электрорафинирования первичного свинца, полученного пиро-гидрометаллургической переработкой местного свинецсодержащего концентрата. Показано, что полученный свинец по своей чистоте не уступает действующим стандартам.

Ключевые слова: полиметаллический, концентрат, электрорафинирование, электролит, анодный.

L.Ye. SARGSYAN, A.A. AGHAYAN

INVESTIGATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF DOMESTIC NATURAL LEAD

The technological parameters of electrorefining process of the natural lead, produced by the pyro-hydrometallurgical treatment of domestic lead-containing concentrate are investigated. It is shown that the purity of this lead is not worse than the standard one.

Keywords: polymetallic, concentrate, electrorefining, electrolyte, anodic.

Ա.Հ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Ա.Մ. ԶԱՔԱՐՅԱՆ, Հ. Հ. ԱԼԱՎԵՐԴՅԱՆ

**ՎԱՐՇՆԹԱՑ ՇԵՐՏԵՐՈՎ ԵՎ ՊՆԴԱՑՈՂ ԼՑԱՆՑՈՒԹԻ ԼՑԱՄԲ
ՄՇԱԿՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ՈՒ
ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ՏԱՐԲԵՐԻ ԿԱՑՈՒՆՈՒԹՅԱՆ
ՀԻՄՆԱՎՈՐՈՒՄԸ**

Բերված են բարդ լեռներկրաբանական և լեռնատեխնիկական պայմաններում վարընթաց շերտերով և պնդացող լցանյութի լցմամբ մշակման համակարգի կատարելագործված տարբերակներ: Առաջադրված են ընդունելի տարբերակներ ըստ տեխնիկատնտեսական ցուցանիշների համեմատության: Յուրաքանչյուր իրավիճակների համար տրված են նաև լցանյութի զանգվածի կայունության հիմնավորման հաշվարկային սխեմաները:

Առանցքային բառեր. մշակման համակարգ, պնդացող լցանյութի զանգված, հաշվարկային սխեմաներ:

Յուրաքանչյուր օգտակար հանածոյի հանույթի տեխնոլոգիայի ընտրությունը, որը համապատասխանում է շահագործվող հանքավայրում երևան եկած լեռներկրաբանական առանձնահատկություններին և դրսևորված լեռնային ճնշման ուսումնասիրման աստիճանին, համարվում է պատասխանատու խնդիր ցանկացած պայմաններում: Հանքերի շահագործման ընթացքում առաջացած խնդիրների լուծումներից կախված են ոչ միայն տեխնիկատնտեսական ցուցանիշները, այլև լեռնային աշխատանքների կատարման անվտանգությունը:

Հետազոտությունները կատարվել են Հայաստանի Հանրապետության Մեղրաձորի ոսկու հանքավայրի պայմանների համար, որտեղ ապարները անկայուն և խիստ անկայուն են: Հանքային մարմինները զառիթափ են և ունեն տարբեր հզորություններ: Հանքային մարմինների ձևաբանությունը բարդ է և հանքաքարն ունի տևապնդելիության հակում: Տևապնդելիությունը կախված է հանքաքարի խոնավության աստիճանից և փոփոխվում է 24 ժամից մինչև մի քանի օր:

Նման հանքավայրերի մշակման համաշխարհային փորձի վերլուծությունը վկայում է, որ նման պայմաններում արդյունավետության և լեռնային աշխատանքների առավել անվտանգ կատարման կարելի է հասնել պնդացող լցանյութի օգտագործմամբ:

Բնական է, որ արդյունավետ է համարվում այն մշակման համակարգը, երբ զուգակցվում են հանքային մարմինների հզորությունները, պնդացող լցանյութի զանգվածի ամրությունը, հանքաքարի և կողային ապարների կայունությունն, աշխատանքների կատարման խորությունը, փորվածքների չափերը և այն սարքավորումները, որոնց օգտագործումը յուրաքանչյուր իրավիճակում ապահովում է բարձր արտադրողականություն:

Ակնհայտ է, որ լցանյութի լցմամբ մշակման համակարգերի կիրառումը մեծացնում է 1 *m* հանքաքարի կորզման ծախսերը (լցանյութի համալիրի ստեղծումը, լցանյութի արժեքը, լցանյութի տեղափոխումը մինչև մշակված տարածություն և այլն):

Այդ պատճառով անհրաժեշտություն է առաջանում օգտակար հանածոյի հանույթի ընթացքում ծագող խնդիրների համար գտնել այնպիսի լուծումներ, որոնք կապահովեն հանքավայրի արդյունավետ մշակում:

Հաշվի առնելով դիտարկվող հանքավայրի լեռնաերկրաբանական և լեռնատեխնիկական պայմանների առանձնահատկությունները և կիրառելի մշակման համակարգերի տեխնիկատնտեսական ցուցանիշների վերլուծությունը [1-3], հաստատվել է, որ այդ պայմանների համար առավել նպատակահարմար է կիրառել «Վարընթաց շերտերով և պնդացող լցանյութի լցմամբ մշակման համակարգը»:

Վարընթաց շերտերով և պնդացող լցանյութի լցմամբ մշակման համակարգի կիրառման դեպքում անհրաժեշտ է լուծել հետևյալ խնդիրները. որոշել լցանյութի պահանջվող ամրությունը, բացահայտել լցանյութի ամրության փոփոխման օրինաչափությունը՝ կախված նրա կազմությունից, աշխատանքների կատարման խորությունից, հանքամարմնի հզորությունից և կիրառելի տարբերակներից:

Այդ համակարգի տարբերակները, որոնք, մեր կարծիքով, կիրառելի են դիտարկվող պայմանների համար, բերված են 1 նկարում:

Դիտարկվող հանքավայրերի պայմանների համար հնարավոր կիրառելի տարբերակների (նկ. 1) հիմնական առանձնահատկություններն են.

Ա տարբերակը վարընթաց շերտերով հանույթ է՝ համատարած պնդացող լցանյութի լցմամբ, որը արհեստականորեն ստեղծված առաստաղ է, և պահվում է ոչ ամբողջական փայտե ամրակապով: Ակնհայտ է, որ 1,2...1,4 չ/հզորությամբ հանքային մարմինների մշակման դեպքում առաջանում է հանքաքարի լրացուցիչ աղքատացում:

Բ տարբերակում ոչ ամբողջական շրջանակներով փայտե ամրակապը փոխարինված է մետաղական ձողերով /1/ և ցանցով /2/, որոնք տեղադրվում են մշակված շերտի հատակում՝ մինչև լցանյութի լցումը: Այդ դեպքում հանքաքարի լրացուցիչ աղքատացումը բացառվում է:

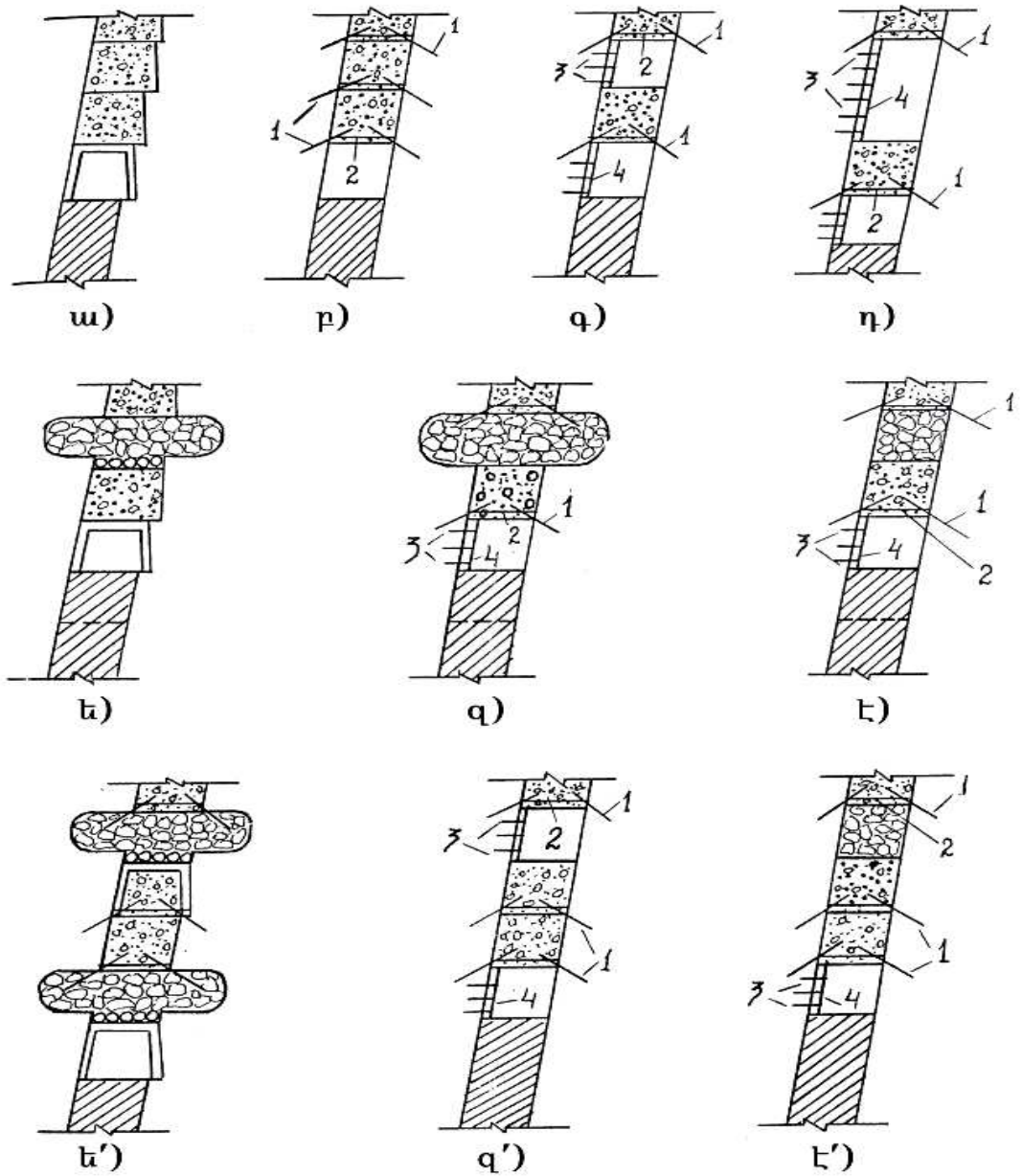
Գ և դ տարբերակներում մետաղական ձողեր /3/ և ցանց /4/ տեղադրվում են նաև մշակված շերտի կախված կողի մերկացված ապարներում, որպեսզի բացառվեն հնարավոր փլվածքները: Այդ տարբերակներով բլոկի մշակման դեպքում կրկնակի և ավելի անգամ կրճատվում է լցանյութի ծախսը: Այս տարբերակներում կարելի է կիրառել նաև պահանգային ամրակապ՝ կախված մերկացված կողային ապարների բարձրությունից և կայունությունից: Ակնհայտ է, որ արդյունքում զգալի չափով կմեծանա բլոկի մշակման ինտենսիվությունը, բացի այդ կլավանա օդափոխությունը, կփոքրանա հանքաքարի կորուստը և աղքատացումը հանքաքարի հանույթի ժամանակ:

Զ տարբերակում պնդացող լցանյութ լցվում է միայն կենտ թվով մշակված շերտերում, իսկ դ տարբերակում՝ յուրաքանչյուր երրորդ մշակված շերտում: Դ տարբերակի առավելությունը գ-ի նկատմամբ այն է, որ կրճատվում է պնդացող լցանյութի ծախսը:

Անհրաժեշտ է նշել, որ պնդացող լցանյութով չլցված շերտերի թիվը նպատակահարմար չէ մեծացնել, որովհետև դիտարկվող հանքավայրի մշակման ժամանակ հանդիպել են դեպքեր, երբ կախված կողի մերկացված ապարների բարձրությունը կազմել է 15 չ/ և մշակված տարածությունում պահանգային ամրակապի առկայության պայմաններում տեղի են ունեցել փլուզումներ:

Ե տարբերակում պնդացող լցանյութով լցված կենտ թվով շերտին հաջորդում է կողային ապարների պայթեցմամբ լցումով գույգ թվով շերտը:

Զ և Է տարբերակները միջանկյալ դիրք են զբաղեցնում գ և Ե տարբերակների միջև:



Նկ. 1. Վարընթաց շերտերով և պնդացող լցանյութի լցմամբ մշակման համակարգի տարբերակները

Ե', գ', Է' տարբերակները համապատասխանաբար Ե, գ, Է տարբերակների տարատեսակներ են:

Ակնհայտ է, որ նկար 1-ում բերված տարբերակներն ա տարբերակի համեմատ, ըստ աշխատանքների կատարման անվտանգության պայմանների, այս կամ այն չափով որոշակի առավելություն ունեն: Սակայն նախապատվությունը կարելի է տալ որևէ մեկին միայն այն դեպքում, երբ համեմատվեն նրանց տեխնիկատնտեսական ցուցանիշները:

Մեր կարծիքով, Մեղրաձորի ոսկու հանքավայրում տեխնիկապես կիրառելի են նկար 1-ում բերված վարընթաց շերտերով և պնդացող լցանյութի լցմամբ մշակման համակարգի ա, բ, գ, դ, ե, զ, և է տարբերակները:

Վարընթաց շերտերով և պնդացող լցանյութի լցմամբ մշակման համակարգում նպատակահարմար տարբերակի ընտրության համար համեմատվող տեխնիկատնտեսական ցուցանիշները գնահատված են բլոկի փաստացի չափերի համար: Ընդունենք, որ որակաքանակական ցուցանիշները (կորուստ և աղքատացում) նույն են բոլոր տարբերակներում: Ընդունենք նաև, որ բոլոր տարբերակներում բլոկները նախապատրաստված են միևնույն կարգով և 1 m^3 պնդացող լցանյութի արժեքը նույն է վերցված է Սոթքի ոսկու հանքավայրի փորձնական տվյալներից [3]:

Վարընթաց շերտերով և պնդացող լցանյութի լցմամբ մշակման համակարգերում դիտարկվող տարբերակների տեխնիկատնտեսական ցուցանիշները բերված են աղյուսակում, որտեղից հետևում է, որ նկար 1-ում բերված բ, գ, դ, ե, զ և է տարբերակներն ա տարբերակի համեմատ առավել արդյունավետ են, հատկապես հիմնական ցուցանիշներով (ցուցանիշներ 8, 10, 11, 13, 15): Առավել լավ ցուցանիշներով բնութագրվում են. գ և դ տարբերակները, այդ ցուցանիշներին մոտ է բ տարբերակը:

Այսպիսով, ստացված արդյունքներից հետևում է, որ վարընթաց շերտերով և պնդացող լցանյութի լցմամբ մշակման համակարգի արդյունավետության ու անվտանգ աշխատանքային պայմանների հետազոտման և պարամետրերի որոշման համար նպատակահարմար են բ, գ և դ տարբերակները (նկ. 1):

Որպեսզի որոշենք վարընթաց շերտերով և պնդացող լցանյութի լցմամբ մշակման համակարգի ընտրված տարբերակներում լցանյութի զանգվածի պահանջվող այն ամրությունը, որը կապահովի աշխատանքների կատարման անվտանգ պայմաններ, կատարենք ճարտարագիտական հաշվարկներ: Դիտարկենք այն դեպքը, երբ համապատասխան բարձրությամբ և լայնությամբ լցանյութի զանգվածն իր ծանրության ուժի ազդեցության տակ պահպանում է հավասարակշռված վիճակ՝ կապակցման և շփման ուժերի շնորհիվ:

Այդպիսի հաշվարկային սխեման համապատասխանում է այն տարբերակին, որտեղ յուրաքանչյուր մշակված շերտ լցվում է պնդացող լցանյութով (նկ. 1 ա) և բոլոր բլոկներն չեն իրականացվում նրա կայունությունը մեծացնող միջոցառումներ:

Այն դեպքում, երբ հանքային մարմնի անկման անկյունը մոտ է 90° -ին, լցանյութի հավասարակշռության հավասարումը կներկայացվի հետևյալ տեսքով.

$$\gamma_1 h_1 m < k 2h_1 + \lambda \gamma_0 H f, \quad (1)$$

որտեղ h_1 -ը լցանյութի զանգվածի բարձրությունն է, m -ը հանքամարմնի հզորությունն է, k -ն՝ լցանյութի և կողային ապարների կապակցման ուժը, γ_1 -ը և γ_0 -ն՝ համապատասխանաբար լցանյութի և կողային ապարների ծավալային զանգվածը, H -ը՝ աշխատանքների կատարման խորությունը, λ -ն՝ կողային հակազդման գործակիցը, f -ը՝ լցանյութի և կողային ապարների շփման գործակիցը:

Դիտարկվող տարբերակների տեխնիկատնտեսական ցուցանիշները

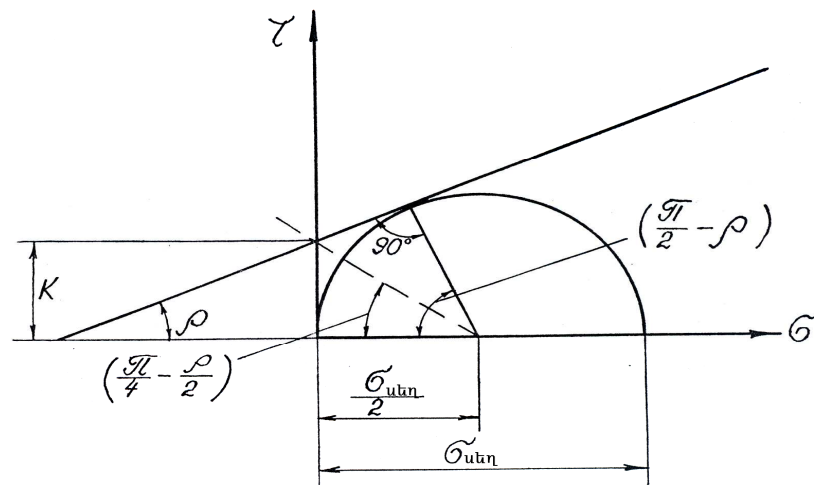
N	Ցուցանիշների անվանումը	Վարընթաց շերտերով և պնդացող լցանյութի լցմամբ մշակման համակարգի տարբերակները						
		ա	բ	գ	դ	ե	զ	է
1	Հանքաքարի արդյունաբերական պաշարները բլոկում, տ	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500
2	Հանքաքարի կորզման գործակիցը	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
3	Հանքաքարի աղքատացումը	0,18*	0,12	0,12	0,12	0,18*	0,18*	0,18*
4	Հանքաքարի շահագործական պաշարները, տ	9150	8395	8395	8395	9150	9150	9150
5	Նախապատրաստական աշխատանքների տեսակարար ծավալը, %	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
6	Փայտի ծախսը, մ ³ /մ ³	0,12	0,002	0,002	0,002	0,12	0,12	0,12
7	Մեկ բանվորի աշխատանքի արտադրողականությունը նախապատրաստական փորվածքների անցկացման դեպքում, մ ³ /հերթ	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
8	Մեկ բանվորի աշխատանքի արտադրողականությունը հանքաքարի հանույթի դեպքում, տ/հերթ	6,0	7,5	7,8	8,1	6,8	7,0	6,7
9	Մեկ բանվորի աշխատանքի արտադրողականությունը մշակման համակարգում, տ/հերթ	5,7	6,0	6,4	6,9	5,9	6,0	5,9
10	Բլոկի ամսական արտադրողականությունը, տ	915	1143	1190	1235	1040	1070	1020
11	Բլոկի մշակման տևողությունը, ամիս	9,6	7,9	7,7	7,4	8,9	8,7	9,1
12	Նախապատրաստական փորվածքների ինքնարժեքը, պ. մ.	1	1	1	1	1	1	1
13	Բլոկից 1 տ հանքաքարի հանույթի ինքնարժեքը, պ. մ.	1,62	1,33	1,11	1	1,23	1,30	1,17
14	1 տ հանքաքարի ինքնարժեքը ըստ ֆրանկո-յուկի, պ. մ.	1,45	1,32	1,08	1	1,16	1,21	1,12
15	1 տ խտանյութի վրա ծախսված հանքաքարի քանակությունը, տ	19,0	16,5	16,5	16,5	19,0	19,0	19,0
16	Ստացված խտանյութի համեմատական արժեքը	1	0,79	0,65	0,60	0,80	0,83	0,77

* - հանքաքարի աղքատացումը մեծանում է, որովհետև ոչ ամբողջական փայտե ամրակապի տեղադրման ժամանակ անհրաժեշտ է կատարել պատկած կողի ապարների պայթեցում:

Այն դեպքում, երբ մշակված շերտում մինչև լցանյութի լցումը կողային ապարները ենթարկվում են առաձգական դեֆորմացիայի, կարելի է ընդունել, որ $\lambda\gamma_0 Hf = 0$: Եթե ընդունենք, որ լցանյութի և կողային ապարների կապակցման ուժը՝ k -ն հավասար է լցանյութում կապակցման ուժին՝ k_0 -ին, ապա կապակցման ուժի (ամրության սահմանն ըստ կտրման), լցանյութի ամրության և ներքին շփման անկյան կապը կարելի է ներկայացնել հետևյալ արտահայտությամբ (նկ. 2).

$$k = k_0 = 0,5\sigma_{\text{սեղ}} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right) = 0,35\sigma_{\text{սեղ}}, \quad (2)$$

որտեղ ρ -ն լցանյութի ներքին շփման անկյունն է, $\sigma_{\text{սեղ}}$ -ը՝ լցանյութի ամրության սահմանը ըստ միառանցքանի սեղմման:



Նկ. 2. Լցանյութի կապակցման ուժի (k) և ամրության ($\sigma_{\text{սեղ}}$) կապի որոշման սխեման

Ըստ Մորքի ոսկու հանքավայրի արտադրական փորձի՝ հաշվարկներում ընդունվել է $\rho = 20^\circ$, $\gamma_1 = 2,1 \text{ տ/մ}^3$:

Ձևափոխելով (2) արտահայտությունը և տեղադրելով համապատասխան մեծությունների որոշման բանաձևերը՝ կստանանք.

$$\sigma_{\text{սեղ}} = \frac{k_0}{0,35} = \frac{\gamma_1 m n}{2 \times 0,35} = 3 m n, \quad (3)$$

որտեղ n -ը պաշարի գործակիցն է, $n=2$:

Երբ մշակվող հանքային մարմնի հզորությունը չի գերազանցում 6 մ-ը, լցանյութի ամրության նվազագույն սահմանը՝

$$\sigma_{\text{սեղ}} = 3 m n = 3 \times 6 \times 2 = 36, \text{ տ/մ}^2 \text{ կամ } 0,36 \text{ ՄՊա}:$$

Այն դեպքում, երբ պնդացած լցանյութի զանգվածի վրա գետեղված է կողային ապարների պայթեցմամբ լցված շերտ (նկ. 1, ե, գ և է տարբերակներ), նրա հավասարակշռության հավասարումը կներկայացվի հետևյալ տեսքով.

$$\gamma_1 h_1 m + \gamma_0 h_2 m \leq k 2 h_1 + \lambda \gamma_0 H f, \quad (4)$$

որտեղ h_2 -ը շերտում կողային ապարների պայթեցումից լցված լցանյութի բարձրությունն է, $h_1 = h_2$, իսկ $\gamma_0 = 2,8 \text{ տ/տ}^2$:

Հաշվի առնելով վերը շարադրված նկատառումները, կստանանք.

$$\sigma_{\text{սեղ}} = m \frac{\gamma_1 h_1 + \gamma_0 h_2}{0,7 \times h_1} n: \quad (5)$$

Կատարելով գործողություններ ըստ ստացված տվյալների՝ կստանանք.

$$\sigma_{\text{սեղ}} = 72 \text{ տ/տ}^2 \text{ կամ } \sigma_{\text{սեղ}} = 0,7 \text{ ՄՊա}:$$

Այժմ դիտարկենք այն դեպքը, երբ լայնության և կողային ապարների կապակցումը թուլանում է, որից կախված պնդացած լայնության զանգվածի կայունությունը պահպանվում է որոշակի միջոցառումների կատարմամբ (նկ. 1, բ, գ և դ տարբերակներ):

Դիտարկումները ցույց են տվել, որ այդպիսի իրավիճակներ առաջանում են այն դեպքում, երբ լայնության հետ հավող ապարներում խոնավությունը և փորվածքի հատակում հանքամարմնի հզորությունը մեծանում են:

Այդ դեպքում լայնության զանգվածի հավասարակշռության հավասարումը կներկայացվի հետևյալ տեսքով.

$$2 h_1 k \geq (\gamma_1 h_1 + \gamma_0 h_2) m n: \quad (6)$$

Ըստ (2) արտահայտության, բերված անհավասարությունը կստանա հետևյալ տեսքը.

$$\sigma_{\text{սեղ}} = \frac{(\gamma_1 + \gamma_0) m n}{0,35}: \quad (7)$$

Ըստ ընդունված տվյալների՝ կստանանք.

$$\sigma_{\text{սեղ}} = \frac{(2,1 + 2,8) \times 6 \times 2}{0,35} = 162 \text{ տ/տ}^2 \text{ կամ } \sigma_{\text{սեղ}} = 1,6 \text{ ՄՊա}:$$

Այժմ գտնենք պնդացած լցանյութի զանգվածի անհրաժեշտ ամրությունն այն պայմաններում, երբ մշակվող շերտի կախված կողի ապարները տեղաշարժվում են մշակված տարածություն մինչև լցանյութի լցումը և չլցված փորվածքներում. (նկար 1, բ, գ և դ տարբերակներ): Այդ դեպքում մշակված շերտերում լցված լցանյութն արհեստական բնամաս է, որի լայնությունը՝ $b = h_1$, իսկ բարձրությունը՝ m : Այդպիսի բնամասերը միմյանցից բաժանված են չլցված շերտերով, որի լայնությունը՝ $a = h_1$:

Այդպիսի իրավիճակներում լցանյութի զանգվածի հավասարակշռության հավասարումը կներկայացվի հետևյալ տեսքով.

$$\sigma_{\text{լգ}} k_{\Delta L} \geq \gamma_0 H \lambda \frac{a+b}{b} k_p \times n, \quad (8)$$

որտեղ H -ը հանքամարմնի մշակման խորությունն է երկրի մակերևույթից, k_F -ն՝ արհեստական բնամասի բեռնվածության գործակիցը, $\sigma_{\text{լգ}}$ -ն՝ լցանյութի ամրության սահմանը, $k_{\Delta L}$ -ը՝ արհեստական բնամասի ձևը հաշվի առնող գործակից, n -ը՝ պաշարի գործակիցը:

(8) հավասարումից հետևում է, որ

$$\sigma_{lg} = \frac{\gamma_0 H \lambda (a + b) \times k_{qq} \times n}{b \times k_{\delta u}} : \quad (9)$$

Կատարենք լցանյութի զանգվածի ամրության (σ_{lg}) գնահատման հաշվարկները ստ հետևյալ տվյալների. $\gamma_0 = 2,8 \text{ տ/մ}^3$, հանքամարմնի մշակման խորությունը մակերևույթից փոխվում է $H=200...400 \text{ մ}$, $\lambda = \frac{v}{1-v}$, երբ $v=0,3$, $\lambda = 0,4$, $k_F=1$ (իրականում $k_F < 1$),

$n=2$, $k_{\delta u} = \sqrt{\frac{b}{m}}$, $b=h_1=2,5 \text{ մ}$, հանքամարմնի հզորությունը փոփոխվում է $m=1...6 \text{ մ}$, պնդացող լցանյութով չլցված մշակված շերտերի գումարային բարձրությունը փոփոխվում է՝ $a=h_1=2.5...5 \text{ մ}$:

Լցանյութի զանգվածի նվազագույն ամրությունը՝

$$\sigma_{lg} = \frac{2,8 \times 200 \times 0,4 \times (2,5 + 2,5) \times 2}{2,5 \times 1,6} = 540 \text{ տ/մ}^2 \text{ կամ } \sigma_{lg} = 5,4 \text{ ՄՊա}:$$

Լցանյութի զանգվածի առավելագույն ամրությունը՝

$$\sigma_{lg} = \frac{2,8 \times 400 \times 0,4 \times (5 + 2,5) \times 2}{2,5 \times 0,6} = 2070 \text{ տ/մ}^2 \text{ կամ } \sigma_{lg} = 20 \text{ ՄՊա}:$$

Այսպիսով, վերը կատարված հաշվարկների արդյունքներից հետևում է, որ բարդ լեռնաերկրաբանական և լեռնատեխնիկական պայմաններում 1 մ-ից մինչև 6 մ հզորությամբ հանքային մարմինների մշակման ժամանակ պնդացած լցանյութի պահանջվող ամրությունը կազմում է $\sigma_{տեղ} = 1...20 \text{ ՄՊա}$:

Խնդիրների լուծման նման մոտեցումը հնարավորություն կտա բարձրացնելու հանքավայրի մշակման արդյունավետությունը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Городецкий П.И.** Основы проектирования горнорудных предприятий.- М.: Углетехиздат, 1955.-415 с.
2. **Агошков М.И., Малахов Г.М.** Подземная разработка рудных месторождений. - М.: Недра, 1966.- 662 с.
3. **Агабалян Ю.А., Закарян А.М.** и др. Обоснование оптимальных технологических параметров разработки отдельных рудных тел и последовательности их освоения на Меградзорском золоторудном месторождении: Отчет х/д Н-065/г. Рег. № 01840033554.-Ереван, 1987.- 83с.

ՀՊՃՀ. Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 14.01. 2008.

А.Г. ОГАНЕСЯН, А.М. ЗАКАРЯН, А.А. АЛАВЕРДЯН

**ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ
КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ С
НИСХОДЯЩИМИ СЛОЯМИ И ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКОЙ**

Приведены усовершенствованные варианты систем разработки с нисходящими слоями и твердеющей закладкой в сложных горногеологических и горнотехнических условиях. Даны расчетные схемы обоснования устойчивости закладочного массива при любых ситуациях.

Ключевые слова: система разработки, твердеющий закладочный массив, расчетная схема.

A.H. HOVHANNISYAN, A.M. ZAKARYAN, H.H. ALAVERDYAN

**SUBSTANTIATION EFFICIENCY AND STABILITY OF THE CONSTRUCTIVE
ELEMENTS OF MINING METHOD WITH DESCENDING LAYERS
AND HARDENING BACKFILL**

Improved versions of mining methods by descending layers and hardening backfill in difficult mining-and-geological and mining conditions are given. In comparison with technical and economic indicators comprehensible variants are preposed. Calculation schemes of hardening filling stability substantiation are given at any situations.

Keywords: mining method, hardening filling, calculation scheme.

ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИИ ПОТЕРЬ МОЩНОСТЕЙ, ЗАВИСЯЩИХ ОТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Рассматриваются вопросы построения функции потерь мощностей в сетях электроэнергетической системы с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов.

Ключевые слова: функция потерь, активная и реактивная мощности, электрическая сеть, ветвь с трансформатором, узел, модель, матрица.

Современная электроэнергетическая система (ЭЭС) характеризуется множеством участков электрических сетей, которые связываются трансформаторами, имеющими комплексные коэффициенты трансформации [1-15]. С учетом этих коэффициентов требуется построить соответствующие функции при решении задачи минимизации потерь активной мощности в сетях.

В [16, 17] предлагаются функции потерь мощностей, однако при отсутствии комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов, в [15] – функции потерь мощностей, где в качестве пассивных параметров электрической сети выбираются коэффициенты распределения, которые в настоящее время не применяются при решении режимных задач ЭЭС. Необходимо отметить, что данная функция слишком сложна даже при применении определенных допущений, что вызывает определенные затруднения и не обеспечивает необходимую маневренность.

В настоящей работе строятся функции потерь мощностей в сетях ЭЭС, зависящие от комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов. В качестве постоянных пассивных параметров применяются Z комплексные обобщенные параметры [19].

Поскольку трансформаторы функционируют в ветвях электрической сети ЭЭС, то, разумеется, необходимо построить такие функции потерь мощностей, в которых будут функционировать параметры ветвей.

Для общности предполагаем, что трансформаторы функционируют во всех ветвях схемы замещения ЭЭС. Если в какой-либо ветви отсутствует трансформатор, то принимаем $\dot{K}_{\text{тв}} = 1$.

Для построения функции потерь мощностей используем следующую систему индексов:

- для станционных узлов: $m(n) = 0, 1, 2, \dots, \Gamma$, где Γ – число независимых узлов. Станционный узел с индексом “0” выбирается в качестве базисного (Б) по напряжениям и балансирующего по мощностям;
- для нагрузочных узлов: $k(l) = \Gamma + 1, \Gamma + 2, \dots, \Gamma + N$, где N – число нагрузочных узлов;

- для произвольных узлов, в состав которых входят как стационарные, так и нагрузочные узлы: $i(j) = 0, 1, 2, \dots, \Gamma, \Gamma + 1, \Gamma + 2, \dots, \Gamma + N$.

Введем обозначения $\Gamma + N = M$, где M - число независимых узлов рассматриваемой ЭЭС. Предполагается также, что число ветвей в рассматриваемой ЭЭС составляет N .

Уравнение состояния при Z форме задания пассивной части ЭЭС имеет вид

$$\dot{U} = \dot{U}_B + Z\dot{I}, \quad (1)$$

где $\dot{U}, \dot{I}$ - столбцевые матрицы комплексных напряжений и токов независимых узлов; $\dot{U}_B$ - комплексное напряжение зависимого стационарного базисного узла; Z - неособенная квадратная матрица комплексных сопротивлений независимых узлов или матрица узловых сопротивлений.

Матричное уравнение (1) в алгебраической форме имеет вид

$$\dot{U}_i = \dot{U}_B + \sum_{j=1}^M Z_{ij} \dot{I}_j. \quad (2)$$

Умножая уравнение (2) на комплексно-сопряженное значение тока $\hat{I}_i$, получим выражение комплексной мощности i -го узла:

$$\dot{S}_i = \dot{U}_B \hat{I}_i + \sum_{j=1}^M \hat{I}_i Z_{ij} \dot{I}_j. \quad (3)$$

Алгебраическая сумма комплексных мощностей независимых и зависимых узлов дает потери активной и реактивной мощностей. Если потери активной и реактивной мощностей обозначить соответственно через Π_a и Π_p , то получим

$$\Pi_a + j\Pi_p = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \hat{I}_i Z_{ij} \dot{I}_j. \quad (4)$$

В функции (4) фигурируют комплексные и комплексно-сопряженные токи независимых узлов, тогда как трансформаторы с комплексными коэффициентами трансформации действуют в ветвях схемы замещения исследуемой ЭЭС. Функционирующие трансформаторы в ветвях учитываются при построении Z матрицы обобщенных параметров ЭЭС.

В [19] установлено следующее выражение для определения Z матрицы обобщенных параметров:

$$\underline{Z} = (\hat{M} Z_B^{-1} \hat{M}^T)^{-1}. \quad (5)$$

В отличие от традиционной Z , при отсутствии трансформаторов матрицу обобщенных параметров с учетом коэффициентов трансформации трансформаторов обозначим через $\underline{Z}$.

В (5) $\hat{M}$ и $\hat{M}^T$ - прямоугольные матрицы соединения с комплексными элементами, имеющие соответственно порядок $M(N)$ и $N(M)$ и формирующиеся на основании следующих моделей:

$$\dot{M}^T = \begin{cases} +1, & \text{если ветвь направлена от узла,} \\ -\dot{K}_T, & \text{если ветвь направлена в узел,} \\ 0, & \text{если ветвь не связана с узлом;} \end{cases} \quad (6)$$

$$\hat{M} = \begin{cases} +1, & \text{если ветвь направлена от узла,} \\ -\hat{K}_T, & \text{если ветвь направлена в узел,} \\ 0, & \text{если ветвь не связана с узлом;} \end{cases} \quad (7)$$

Z_B – диагональная матрица комплексных сопротивлений ветвей.

При действительных коэффициентах трансформации трансформаторов матрица (5) получается симметричной относительно главной диагонали и в структурном отношении ничем не отличается от Z в случае отсутствия коэффициентов трансформации.

С учетом (5) формула (4) принимает следующий вид:

$$\Pi_a + j\Pi_p = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \hat{I}_i (\hat{M} Z_B^{-1} \dot{M}^T)^{-1} \hat{I}_j. \quad (8)$$

Фактически, полученное выражение изображает функцию потерь мощностей, зависящих от комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов. Требуется установить соответствующие выражения для потерь активной и реактивной мощностей. Для установления выражений Π_a и Π_p необходимо правую часть (8) также представить в виде действительной и мнимой слагающих.

Разлагая (4) на действительные и мнимые составляющие, получим

$$\Pi_a = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [(I'_i I'_j + I''_i I''_j) R_{ij}], \quad (9)$$

$$\Pi_p = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [(I'_i I'_j + I''_i I''_j) X_{ij}], \quad (10)$$

где

$$I'_i(I'_j) = \operatorname{Re}[\dot{I}_i(\dot{I}_j)], \quad (11)$$

$$I''_i(I''_j) = \operatorname{Im}[\dot{I}_i(\dot{I}_j)]. \quad (12)$$

В матричной форме выражения (9) и (10) представляются в виде

$$\Pi_a = I'^T \underline{R} I' + I''^T \underline{R} I'', \quad (13)$$

$$\Pi_p = I'^T \underline{X} I' + I''^T \underline{X} I'', \quad (14)$$

где T - знак транспонирования.

Разлагая выражение (5) на действительные и мнимые составляющие, получим

$$\underline{Z} = \underline{R} + j\underline{X} = \operatorname{Re} \left[(\hat{M} Z_B^{-1} \dot{M}^T)^{-1} \right] + j \operatorname{Im} \left[(\hat{M} Z_B^{-1} \dot{M}^T)^{-1} \right], \quad (15)$$

при этом

$$\underline{R} = \text{Re} \left[\left(\hat{M} Z_B^{-1} \dot{M}^T \right)^{-1} \right], \quad (16)$$

$$\underline{X} = \text{Im} \left[\left(\hat{M} Z_B^{-1} \dot{M}^T \right)^{-1} \right], \quad (17)$$

где $\underline{R}$ и $\underline{X}$ - квадратные матрицы узловых активных и реактивных сопротивлений с учетом коэффициентов трансформации трансформаторов.

С учетом (16) и (17) выражения (13) и (14) окончательно можно представить в виде

$$\Pi_a = I'^T \text{Re} \left[\left(\hat{M} Z_B^{-1} \dot{M}^T \right)^{-1} \right] I' + I''^T \text{Re} \left[\left(\hat{M} Z_B^{-1} \dot{M}^T \right)^{-1} \right] I'', \quad (18)$$

$$\Pi_p = I'^T \text{Im} \left[\left(\hat{M} Z_B^{-1} \dot{M}^T \right)^{-1} \right] I' + I''^T \text{Im} \left[\left(\hat{M} Z_B^{-1} \dot{M}^T \right)^{-1} \right] I''. \quad (19)$$

Если I'^T, I''^T и I', I'' - соответственно строчные и столбцовые матрицы порядков $(1(M))$ и $(M(1))$, то $\underline{R}$ и $\underline{X}$ - квадратные матрицы порядков $(M(M))$ или M . Выражения (18) и (19) изображают функции потерь активной и реактивной мощностей, зависящих от коэффициентов трансформации трансформаторов. Для большей ясности целесообразно рассмотреть конкретный численный пример.

Рассматривается схема замещения одной ЭЭС, состоящей из семи узлов и из десяти ветвей, причем в ветвях 5, 6, 7 функционируют трансформаторы (см. рис.).

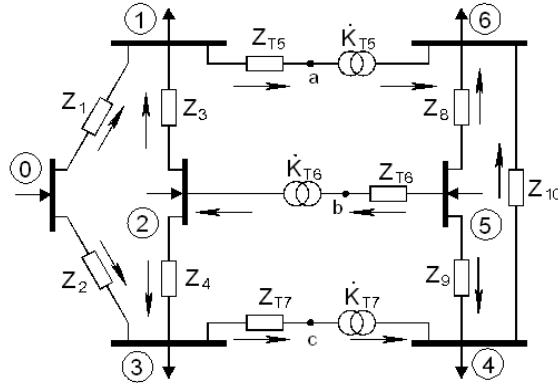


Рис. Электрическая схема замещения рассматриваемой ЭЭС

Неособенная матрица узловых комплексных проводимостей с учетом коэффициентов трансформации трансформаторов имеет следующую структуру:

$$\begin{bmatrix} Y_1 + Y_3 + Y_5 & -Y_3 & 0 & 0 & 0 & -Y_5 \hat{K}_{T5} \\ -Y_3 & Y_3 + Y_4 + Y_6 K_{T6}^2 & -Y_4 & 0 & -Y_6 \hat{K}_{T6} & 0 \\ 0 & -Y_4 & Y_2 + Y_4 + Y_7 & -Y_7 \hat{K}_{T7} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Y_7 \hat{K}_{T7} & Y_7 K_{T7}^2 + Y_9 & -Y_9 & 0 \\ 0 & -Y_6 \hat{K}_{T6} & 0 & -Y_9 & Y_6 + Y_8 + Y_9 & -Y_8 \\ -Y_5 \hat{K}_{T5} & 0 & 0 & 0 & -Y_8 & Y_5 K_{T5}^2 + Y_8 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Предположим, заданы численные значения комплексных проводимостей ветвей и коэффициенты трансформации трансформаторов:

$$\begin{aligned}
Y_1 &= 0,020533 - j0,033156, & Y_2 &= 0,010065 - j0,031507, \\
Y_3 &= 0,023388 - j0,039283, & Y_4 &= 0,030179 - j0,056281, \\
Y_5 &= 0,000747 - j0,027882, & Y_6 &= 0,000267 - j0,021094, \\
Y_7 &= 0,000514 - j0,019828, & Y_8 &= 0,020126 - j0,028543, \\
Y_9 &= 0,014750 - j0,025298,
\end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
\dot{K}_{T5} &= 0,526100 + j0,000000, & \dot{K}_{T6} &= 0,500000 + j0,000000, \\
\dot{K}_{T7} &= 0,966600 + j0,000000.
\end{aligned} \tag{22}$$

Как можно заметить, коэффициенты трансформации трансформаторов заданы в виде действительных чисел. В результате неособенная матрица узловых проводимостей представляется в виде

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix}
0,044667 - & - 0,023388 + & & & & - 0,000393 + \\
- j0,100296 & + j0,039258 & & & & + j0,014669 \\
- 0,023388 + & 0,053634 - & - 0,030179 + & & & - 0,000133 + \\
+ j0,039258 & - j0,100812 & + j0,056281 & & & 0 \\
0 & - 0,030179 + & 0,040758 - & - 0,000496 + & & 0 \\
& + j0,056281 & - j0,107616 & + j0,019166 & & 0 \\
0 & 0 & - 0,000496 + & 0,015230 - & - 0,014750 + & 0 \\
& & + j0,019166 & - j0,043824 & + j0,025298 & \\
0 & - 0,000133 + & 0 & - 0,014750 + & 0,035144 - & - 0,020127 + \\
& + j0,010547 & & + j0,025298 & - j0,074935 & + j0,028543 \\
- 0,000393 + & 0 & 0 & 0 & - 0,020127 + & 0,020333 - \\
+ j0,014669 & & & & + j0,028543 & - j0,03626
\end{bmatrix} \tag{23}$$

Как видно, матрица (23) является симметричной относительно главной диагонали, что является результатом наличия в ветвях трансформаторов с действительными коэффициентами трансформации.

После обращения $\underline{Y}$ матрицы узловых проводимостей (23) получим $\underline{Z}$ матрицу узловых сопротивлений:

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} 6,538512 + & 4,626134 + & 2,807197 + & 3,311905 + & 3,949917 + & 6,808824 + \\ + j13,892331 & + j10,334948 & + j7,226781 & + j8,829036 & + j9,455223 & + j11,508021 \\ 4,626134 + & 9,906024 + & 5,637215 + & 5,862436 + & 5,642608 + & 6,729423 + \\ + j10,334948 & + j20,515057 & + j13,803853 & + j13,503431 & + j13,062897 & + j13,872145 \\ 2,807197 + & 5,637215 + & 6,904857 + & 6,060103 + & 4,038416 + & 4,428944 + \\ + j7,226781 & + j13,803853 & + j17,988570 & + j13,944318 & + j11,685791 & + j11,910643 \\ 3,311905 + & 5,862436 + & 6,060103 + & 9,510683 + & 2,521153 + & 2,267158 + \\ + j8,829036 & + j13,503431 & + j13,944318 & + j42,054061 & + j26,893885 & + j24,905766 \\ 3,949917 + & 5,642609 + & 4,038416 + & 2,521153 + & 6,109786 + & 4,814560 + \\ + j9,455223 & + j13,062897 & + j11,685791 & + j26,893885 & + j35,611131 & + j32,591404 \\ 6,808824 + & 6,729423 + & 4,428944 + & 2,267158 + & 4,814560 + & 16,988915 + \\ + j11,508021 & + j13,872145 & + j11,910643 & + j24,905766 & + j32,591404 & + j51,108280 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Полученная $\underline{Z}$ матрица также является симметричной относительно главной диагонали, и она не приводит к несимметрии функции потерь (18) и (19). Как было отмечено выше, это связано с тем, что коэффициенты трансформации трансформаторов задаются в виде действительных чисел.

Теперь рассмотрим случай, когда они задаются в виде комплексных чисел, в данном случае:

$$\begin{aligned} \dot{K}_{T5} &= 0,49000 + j0,004780, & \dot{K}_{T6} &= 0,500000 + j0,004520, \\ \dot{K}_{T7} &= 0,682000 + j0,003300. \end{aligned} \quad (25)$$

При этом неособенная матрица узловых комплексных проводимостей имеет вид

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} 0,044667 - & - 0,023387 + & & & & - 0,000232 + \\ - j0,100296 & + j0,039258 & 0 & 0 & 0 & + j0,013665 \\ - 0,023387 + & 0,053634 - & - 0,030179 + & & - 0,000228 + & \\ + j0,039258 & - j0,100812 & + j0,056280 & 0 & + j0,010545 & 0 \\ & - 0,030179 + & 0,040757 - & - 0,000284 + & & \\ 0 & + j0,056280 & - j0,107615 & + j0,013524 & 0 & 0 \\ & & - 0,000415 + & 0,014988 - & - 0,014750 + & \\ 0 & 0 & + j0,013520 & - j0,034520 & + j0,025298 & 0 \\ & - 0,000004 + & & - 0,014750 + & 0,035143 - & - 0,020126 + \\ 0 & + j0,010548 & 0 & + j0,025298 & - j0,074935 & + j0,028543 \\ - 0,000499 + & & & & - 0,020126 + & 0,020305 - \\ + j0,013658 & 0 & 0 & 0 & + j0,028543 & - j0,035238 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Можно заметить, что полученная неособенная матрица узловых комплексных проводимостей является несимметричной относительно главной диагонали, что является

результатом наличия трансформаторов с комплексными коэффициентами трансформации.

После обращения неособенной квадратной несимметричной матрицы $\underline{Y}$ получим неособенную квадратную матрицу узлов $\underline{Z}$ сопротивлений, в данном случае:

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} 6,422048 + & 4,509942 + & 2,589202 + & 4,048259 + & 4,118388 + & 6,861238 + \\ + j13,810095 & + j10,155279 & + j6,889253 & + j10,175757 & + j10,170621 & + j12,034803 \\ 4,485795 + & 9,673146 + & 5,198133 + & 6,787363 + & 5,876330 + & 6,908449 + \\ + j10,180788 & + j20,165795 & + j13,201076 & + j14,999822 & + j13,947617 & + j14,650794 \\ 2,576071 + & 5,209540 + & 6,261476 + & 6,442824 + & 4,040075 + & 4,402862 + \\ + j6,900661 & + j13,189479 & + j17,114905 & + j14,409036 & + j11,903657 & + j12,105554 \\ 3,968104 + & 6,766331 + & 6,375919 + & 14,252961 + & 3,694960 + & 3,194287 + \\ + j10,212992 & + j15,004277 & + j14,446369 & + j56,204920 & + j35,662071 & + j33,143074 \\ 4,045988 + & 5,888640 + & 4,013953 + & 3,718918 + & 5,858541 + & 4,645975 + \\ + j10,197802 & + j13,914946 & + j11,900092 & + j35,635910 & + j41,007945 & + j37,867104 \\ 6,737599 + & 6,879996 + & 4,351159 + & 3,188283 + & 4,617039 + & 17,210307 + \\ + j12,132493 & + j14,670081 & + j12,131392 & + j33,153676 & + j37,902807 & + j56,548979 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Как можно заметить, полученная матрица является несимметричной, поскольку коэффициенты трансформации трансформаторов являются комплексными величинами. Несимметричность матрицы $\underline{Z}$ вызывает также несимметричность функции потерь мощностей. Отметим, что с точки зрения вычислительных работ, несимметричность матрицы узловых комплексных $\underline{Z}$ вызывает определенное неудобство. Поэтому вопрос симметризации матрицы $\underline{Z}$ важен для решения практических задач.

Предлагается следующий способ симметризации несимметричной матрицы $\underline{Z}$:

$$\underline{Z} = \frac{1}{2}(\underline{Z} + \underline{Z}^T) + \frac{1}{2}(\underline{Z} - \underline{Z}^T) \quad (28)$$

В результате матрица (27) представляется в виде

$$\begin{aligned}
& \left[\begin{array}{l}
6,422048 + \quad 4,509942 + \quad 2,589202 + \quad 4,048259 + \quad 4,118388 + \quad 6,861238 + \\
+ j13,810095 \quad + j10,155279 \quad + j6,889253 \quad + j10,175757 \quad + j10,170621 \quad + j12,034803 \\
4,485795 + \quad 9,673146 + \quad 5,198133 + \quad 6,787363 + \quad 5,876330 + \quad 6,908449 + \\
+ j10,180788 \quad + j20,165795 \quad + j13,201076 \quad + j14,999822 \quad + j13,947617 \quad + j14,650794 \\
2,576071 + \quad 5,209540 + \quad 6,261476 + \quad 6,442824 + \quad 4,040075 + \quad 4,402862 + \\
+ j6,900661 \quad + j13,189479 \quad + j17,114905 \quad + j14,409036 \quad + j11,903657 \quad + j12,105554 \\
3,968104 + \quad 6,766331 + \quad 6,375919 + \quad 14,252961 + \quad 3,694960 + \quad 3,194287 + \\
+ j10,212992 \quad + j15,004277 \quad + j14,446369 \quad + j56,204920 \quad + j35,662071 \quad + j33,143074 \\
4,045988 + \quad 5,888640 + \quad 4,013953 + \quad 3,718918 + \quad 5,858541 + \quad 4,645975 + \\
+ j10,197802 \quad + j13,914946 \quad + j11,900092 \quad + j35,635910 \quad + j41,007945 \quad + j37,867104 \\
6,737599 + \quad 6,879996 + \quad 4,351159 + \quad 3,188283 + \quad 4,617039 + \quad 17,210307 + \\
+ j12,132493 \quad + j14,670081 \quad + j12,131392 \quad + j33,153676 \quad + j37,902807 \quad + j56,548979
\end{array} \right] =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left[\begin{array}{l}
6,422048 + \quad 4,497868 + \quad 2,582636 + \quad 4,0081815 + \quad 4,082188 + \quad 6,799418 + \\
+ j13,810095 \quad + j10,168033 \quad + j6,894957 \quad + j10,194374 \quad + j10,184211 \quad + j12,083648 \\
4,497868 + \quad 9,673146 + \quad 5,203836 + \quad 6,776847 + \quad 5,882485 + \quad 6,894222 + \\
+ j10,168033 \quad + j20,165795 \quad + j13,195277 \quad + j15,002049 \quad + j13,931281 \quad + j14,660437 \\
2,582636 + \quad 5,203836 + \quad 6,261476 + \quad 6,409371 + \quad 4,027014 + \quad 4,377010 + \\
+ j6,894957 \quad + j13,195277 \quad + j17,114905 \quad + j14,427702 \quad + j11,901874 \quad + j12,118473 \\
4,008181 + \quad 6,776847 + \quad 6,409371 + \quad 14,252961 + \quad 3,706939 + \quad 3,191285 + \\
+ j10,194374 \quad + j15,002049 \quad + j14,427702 \quad + j56,20492 \quad + j35,648990 \quad + j33,148375 \\
4,082188 + \quad 5,882485 + \quad 4,027014 + \quad 3,706939 + \quad 5,858541 + \quad 4,631507 + \\
+ j10,184211 \quad + j13,931281 \quad + j11,901874 \quad + j35,648990 \quad + j41,007945 \quad + j37,884955 \\
6,799418 + \quad 6,894222 + \quad 4,377010 + \quad 3,191285 + \quad 4,631507 + \quad 17,210307 + \\
+ j12,083648 \quad + j14,660437 \quad + j12,118473 \quad + j33,148375 \quad + j37,884955 \quad + j56,548979
\end{array} \right] +
\end{aligned}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0,012073 - & 0,006565 - & 0,040077 - & 0,0362 - & 0,061819 - \\ & - j0,012754 & - j0,005704 & - j0,018617 & - j0,013590 & - j0,048845 \\ - 0,012073 + & 0 & - 0,005703 + & 0,010516 - & - 0,006154 + & 0,014226 - \\ + j0,012754 & & + j0,005798 & - j0,002227 & + j0,016335 & - j0,009643 \\ - 0,006565 + & 0,005703 - & 0 & 0,033452 - & 0,013061 + & 0,025851 - \\ + j0,005704 & - j0,005798 & & - j0,018666 & + j0,001782 & - j0,012919 \\ - 0,040077 + & - 0,010516 + & - 0,033452 + & 0 & - 0,011979 + & 0,003001 - \\ + j0,018617 & + j0,002227 & + j0,018666 & & + j0,013080 & - j0,005300 \\ - 0,0362 + & 0,006154 - & - 0,013061 - & 0,011979 - & 0 & 0,014467 - \\ + j0,013590 & - j0,016335 & - j0,001782 & - j0,013080 & & - j0,017851 \\ - 0,061819 + & - 0,014226 + & - 0,025851 + & - 0,003001 + & - 0,014467 + & 0 \\ + j0,048845 & + j0,009643 & + j0,012919 & + j0,005300 & + j0,017851 & \end{bmatrix}$$

Количественное и качественное исследование показывает, что последняя матрица не вызывает определенных изменений в величине потерь мощностей Π_a и Π_p .

В результате для исследования функций потерь Π_a и Π_p при учете комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов рекомендуется пользоваться расчетной матрицей

$$\begin{bmatrix} 6,422048 + & 4,497868 + & 2,582636 + & 4,0081815 + & 4,082188 + & 6,799418 + \\ + j13,810095 & + j10,168033 & + j6,894957 & + j10,194374 & + j10,184211 & + j12,083648 \\ 4,497868 + & 9,673146 + & 5,203836 + & 6,776847 + & 5,882485 + & 6,894222 + \\ + j10,168033 & + j20,165795 & + j13,195277 & + j15,002049 & + j13,931281 & + j14,660437 \\ 2,582636 + & 5,203836 + & 6,261476 + & 6,409371 + & 4,027014 + & 4,377010 + \\ + j6,894957 & + j13,195277 & + j17,114905 & + j14,427702 & + j11,901874 & + j12,118473 \\ 4,008181 + & 6,776847 + & 6,409371 + & 14,252961 + & 3,706939 + & 3,191285 + \\ + j10,194374 & + j15,002049 & + j14,427702 & + j56,20492 & + j35,648990 & + j33,148375 \\ 4,082188 + & 5,882485 + & 4,027014 + & 3,706939 + & 5,858541 + & 4,631507 + \\ + j10,184211 & + j13,931281 & + j11,901874 & + j35,648990 & + j41,007945 & + j37,884955 \\ 6,799418 + & 6,894222 + & 4,377010 + & 3,191285 + & 4,631507 + & 17,210307 + \\ + j12,083648 & + j14,660437 & + j12,118473 & + j33,148375 & + j37,884955 & + j56,548979 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Как известно,

$$I' = I'(P, Q, U, \Psi_U), \quad I'' = I''(P, Q, U, \Psi_U). \quad (30)$$

Тогда (18) и (19) в виде неявновыраженных функций можно написать в виде

$$\Pi_a = \Pi_a(P, Q; U, \Psi_U; K'_T, K''_T), \quad (31)$$

$$\Pi_p = \Pi_p(P, Q; U, \Psi_U; K'_T, K''_T), \quad (32)$$

где

$$K'_T = \operatorname{Re}(\dot{K}_T), \quad (33)$$

$$K''_T = \operatorname{Im}(\dot{K}_T). \quad (34)$$

Полученные выражения (31) и (32) позволяют рассмотреть чувствительность Π_a и Π_p относительно P, Q, U, Ψ_U , а также K'_T и K''_T .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мельников Н.А.** Расчет режимов работы сетей электрических систем. - М.: Госэнергоиздат, 1950.- 324 с.
2. **Фазылов Х.Ф.** Теория и методы расчета электрических систем.- Ташкент: АНУзССР, 1953.-176 с.
3. **Ward J.B., Hale H.W.** Digital computer solution of power – flow problems // Power Apparatus and systems. -1956.- V. 75, N 24.- P. 398-404.
4. **Холмский В.Г.** Учет ограничений при расчетах режимов электрической системы, обеспечивающих наименьшие потери //Электричество.-1962.- №4.-С.19-23.
5. **Brown H.E., Carter G.H., Happ H.H., Person C.E.** Power flow solutions impedance matrix iterative method // IEEE Transaction.-1963.-PAS-82.-N 65.- P. 1-10.
6. **Мельников Н.А.** Метод расчета рабочих режимов для схем, содержащих элементы трансформации с комплексными параметрами // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.-1964.-N 4.-С. 427-433.
7. **Холмский В.Г., Щербина Ю.В., Сулеймаков В.Н., Банин Д.Б., Метельский Е.Н.** Выбор оптимальных коэффициентов трансформации в замкнутых электрических сетях методом дискретного спуска // Электрические сети и системы: Межведомственный республиканский научно-технический сборник.-Львов, - 1967.-Вып. 3.-С. 86-91.
8. **Бартоломей П.Н.** Об учете коэффициентов трансформации при расчете режимов электрических сетей методом уравнений узловых напряжений // Электричество.-1971.- N 10.- С.88-90.
9. **Сенди К.К.** Современные методы анализа электрических систем.-М.: Энергия, 1971.-360 с.
10. **Фазылов Х.Ф., Насыров Т.Х., Брискин И.Л.** К расчету установившихся режимов энергосистем с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов // Электричество.-1972.-N 12.- С. 7-9.
11. **Гурский С.К., Новицкий Б.Б., Уласевич А.Ф.** Формирование обобщенных параметров и уравнений режима электроэнергетических систем с учетом комплексных коэффициентов трансформации // Известия вузов СССР. Энергетика.-1979.-N 2.- С. 8-15.
12. **Жуков Л.А., Стратан И.П.** Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем.- М.: Энергия, 1979.- 416 с.
13. **Фазылов Х.Ф., Насыров Т.Х.** Линейные расчетные модели сетей электрических систем.- Ташкент: ФАН УзССР, 1982.-96 с.
14. **Александров О.И., Бабкевич Г.Г.** Оперативная коррекция режима электрической сети изменением коэффициента трансформации с регулированием под нагрузкой // Изв. вузов. Энергетика.-1991.-N6. -19-С.-16.
15. **Александров О.И., Домников С.В., Бабкевич Г.Г.** Общая формула потерь мощности в электрических сетях с учетом комплексных коэффициентов трансформации в ветвях //Изв. вузов СССР. Энергетика.-1991.-№9.-С.6-11.

16. **Хачатрян К.В., Гладунчик Е.А., Мнацаканян М.А., Тохунц А.Р.** Минимизация потерь активной мощности в сетях электроэнергетической системы // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2004.-Т. 57, N 3.-С. 434-444.
17. **Хачатрян В.С., Тохунц А.Р.** Минимизация потерь активной мощности в электрических сетях с учетом ограничений, налагаемых на режимные параметры // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2005.-Т. 58, N3.-С. 481-489.
18. **Хачатрян В.С., Хачатрян К.В., Григорян С.Э., Мнацаканян М.А., Тохунц А.Р., Джаангирян В.В.** Метод построения Y матрицы обобщенных параметров с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов // Вестник ИАА.-2007.- Т. 4, N 3.-С. 340-349.
19. **Хачатрян В.С., Бадалян Н.П., Хачатрян К.В.** Построение и коррекция Z матрицы обобщенных параметров электрической сети с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2008.- N 1. - С. 34-46.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 14.09.2007.

**Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ն.Պ. ԲԱԴԱԼՅԱՆ, Կ.Վ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ,
Ս.Է. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ**

**ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՈՒՄՏՆԵՐԻ ՖՈՒՆԿՑԻԱՅԻ ԿԱՌՈՒՑՈՒՄԸ՝
ԿԱԽՎԱԾ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐՆԵՐԻ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՑԻԱՅԻ ԳՈՐԾԱԿԵՑՆԵՐԻՑ**

Դիտարկվում է էլեկտրաէներգետիկական համակարգի ցանցի հզորության կորուստների ֆունկցիաների կառուցումը՝ կախված տրանսֆորմատորների տրանսֆորմացիայի գործակիցներից:

Առանցքային բառեր. կորուստների ֆունկցիա, ակտիվ և ռեակտիվ հզորություններ, էլեկտրական ցանց, տրանսֆորմատորով ճյուղ, հանգույց, մոդել, մատրից:

**V.S. KHACHATRYAN, N.P. BADALYAN, K.V. KHACHATRYAN,
S.E. GRIGORYAN**

**POWER LOSS FUNCTION CONSTRUCTION DEPENDING ON TRANSFORMER
TRANSFORMATION COEFFICIENTS**

The problem of power loss function construction in electrical power system networks based on complex coefficients of transformer transformation is considered.

Keywords: loss function, active and reactive powers, electric network, branch with the transformer, flow, unit, model, matrix.

Ж.Д. ДАВИДЯН

СОПОСТАВЛЕНИЕ СИНХРОННОГО И АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРОВ ПО УРОВНЮ ПОТЕРЬ В УСЛОВИЯХ МАЛЫХ ГЭС

Показано, что использование асинхронных генераторов вместо синхронных в условиях малых ГЭС приводит к увеличению потерь энергии в блоке турбина – генератор – трансформатор примерно на 30%, стоимость которых за год соизмерима со стоимостью генератора. Использование асинхронных генераторов вместо синхронных в условиях малых ГЭС нецелесообразно.

Ключевые слова: асинхронный генератор, синхронный генератор, потери энергии, малая ГЭС.

В настоящее время в Армении на реках и технических водоводах в большом количестве сооружаются малые ГЭС. В связи с этим перед проектировщиками и предпринимателями встаёт вопрос целесообразного выбора типа генераторов для этих ГЭС – синхронного или асинхронного.

Синхронные генераторы с системой автоматического регулирования возбуждения являются классическими источниками электроэнергии переменного тока. При параллельной работе с сетью они обладают рядом достоинств – возможностью работы в активном режиме при коэффициенте мощности, равном единице (для малых ГЭС этот режим наиболее благоприятен), либо в активно-компенсаторном режиме при опережающем коэффициенте мощности и регулировании напряжения в узлах системы, высокой перегрузочной способностью, форсировкой тока короткого замыкания и др. Синхронные генераторы мощностью выше 100...200 кВт не выпускаются в Армении. Вследствие этого генераторы больших мощностей (порядка 500...1000 кВт) экспортируются из России или европейских стран по сравнительно высоким ценам.

На ГЭС могут быть использованы асинхронные генераторы. Для этого, как известно, асинхронный двигатель, будучи подсоединённым к сети, приводится во вращение со скоростью выше синхронной. При этом асинхронная машина генерирует активную мощность, но потребляет реактивный отстающий ток для возбуждения машины от сети, работая всегда при отстающем коэффициенте мощности. При номинальной активной мощности скольжение имеет номинальную величину (порядка 3 %), но обратного знака относительно двигательного режима. Асинхронная машина по сравнению с явнополюсной синхронной имеет более простую конструкцию, а именно – цилиндрический короткозамкнутый ротор со стержневой обмоткой, отсутствует система возбуждения и устройства передачи тока возбуждения в ротор (контактные кольца или бесконтактные возбудители). Однако вследствие изложенных особенностей асинхронные генераторы имеют повышенные потери энергии. Кроме того, они не обладают упомянутыми достоинствами синхронных генераторов.

Асинхронные двигатели требуемых наиболее распространённых мощностей (500...1000 *кВт*) выпускаются в больших количествах в России и в других странах. Учитывая относительную простоту конструкции, массовость производства, а также исходное функциональное назначение (двигатель, а не генератор), цена асинхронного двигателя в несколько раз ниже по сравнению с ценой синхронного генератора. Кроме того, в Армении имеется достаточно большое количество короткозамкнутых асинхронных двигателей указанных мощностей, которые могут быть использованы в качестве генераторов на ГЭС.

С учётом вышеизложенного выдвигается вопрос альтернативности выбора типа генератора. Важными условиями, которые необходимо учесть при выборе типа генератора для малой ГЭС, являются величина и стоимость потерь энергии при использовании синхронного или асинхронного генератора.

Синхронный генератор в режиме параллельной работы с сетью в условиях малой ГЭС, с целью минимизации потерь в генераторе, трансформаторе и сети, должен использоваться в режиме чисто активной нагрузки при коэффициенте мощности, равном единице. Назовём этот режим «активным», в отличие от «активно-индуктивного», для которого даются номинальные каталожные данные машины.

Асинхронный генератор всегда работает в «активно-индуктивном» режиме при отстающем коэффициенте мощности. По сравнению с синхронным генератором, работающим в «активном» режиме, в асинхронном генераторе увеличиваются потери в машине и сетевом трансформаторе от протекающего реактивного тока, а также механические потери в машине и турбине вследствие повышения скорости на величину скольжения.

В работе приводится сопоставительный количественный анализ величин потерь энергии энергоагрегата (блока «турбина – генератор – трансформатор») при использовании синхронного или асинхронного генератора. Расчёт выполняется для условного агрегата мощностью 500 *кВт* со скоростью вращения 1000 *об/мин*. Эти параметры агрегата наиболее востребованы для малых ГЭС Армении. Результаты расчёта приведены в таблице.

Энергоагрегат с синхронным генератором

Генератор

В качестве генератора рассматривается синхронный генератор типа СГ2-500-6УЗ (ГАЕИ.528354.003/0506 РЭ) производства ОАО «Сафоновский электромашиностроительный завод» (Россия). Номинальные параметры генератора следующие: мощность 500 *кВт*, скорость вращения 1000 *об/мин*, напряжение 400 В, частота 50 Гц, коэффициент мощности 0,8, коэффициент полезного действия 95 %.

Расчёт выполняется для «активного» режима при следующих параметрах: мощность 500 *кВт*, скорость вращения 1000 *об/мин*, коэффициент мощности 1,0.

Исходя из заданной величины КПД, определены потери генератора в номинальном режиме. Распределение потерь по своим составляющим при номинальной мощности принято на основании расчёта [1] и приведено в таблице с некоторым округлением (см. табл., столбцы 2,3).

Потери в обмотке статора пропорциональны квадрату тока. В «активном» режиме они уменьшаются относительно потерь «номинального» режима вследствие уменьшения тока статора (за счёт исключения реактивной составляющей) и составляют

$$P_{cm(A)} = P_{cm(N)} (I \cos \varphi_{(N)} / I)^2 = 10,5 (0,8)^2 = 6,7 \text{ кВт},$$

где $P_{cm(N)}$ – потери в обмотке статора в «номинальном» режиме; I – ток статора в «номинальном» режиме; $\cos \varphi_{(N)}$ – коэффициент мощности в «номинальном» режиме.

Прочие потери остаются без изменения.

Таблица

Потери энергии в энергоагрегате

Тип машины	Синхронный генератор			Асинхронная машина		
Режим	генератор			двигатель	генератор	
Мощность активная	500 кВт		500 кВт	500 кВт	500 кВт	
Скорость вращения	1000 об/мин		1000 об/м	966 об/мин	1036 об/м	
Кэфф. мощности	$\cos \varphi = 0,8$		$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,8$	$\cos \varphi = 0,8$	
Потери	%	кВт	кВт	%	кВт	кВт
1	2	3	4	5	6	7
Электромашина						
Механические	10	2,6	2,6	10	2,3	2,9
В стали статора	20	5,3	5,3	20	8,0	8,0
В обмотке статора*	40	10,5	6,7	40	15,5	15,5
В обмотке ротора	30	7,9	7,9	30	11,8	11,8
Суммарные	100	26,3	22,5	100	37,6	38,2
Гидротурбина						
Механические		58,5	58,0			66,5
Трансформатор						
В стали		1,7	1,7			1,7
В обмотках		7,6	4,9			7,6
Суммарные		9,3	6,6			9,3
Блок: генератор – турбина – трансформатор						
КПД блока			87,1			114,0
			85,2 %			81,4 %

* В потерях в обмотке статора учтены также дополнительные потери.

Гидротурбина

КПД гидротурбины принимается 90 %.

Потери в турбине в «активном» режиме генератора составляют

$$\Delta P_T = P_T (1 - \eta) / \eta = (P_{Гс} + \Delta P_{Гс}) (1 - \eta) / \eta = (500 + 22,5) (1 - 0,9) / 0,9 = 58,0 \text{ кВт},$$

где P_T – мощность на валу турбины; $P_{Гс}$ – мощность генератора активная; $\Delta P_{Гс}$ – потери в генераторе в «активном» режиме; $\eta = 0,9$ – КПД турбины.

Трансформатор

Рассматривается трансформатор типа ТМ–630/10 [2]. Номинальные параметры трансформатора следующие: мощность полная 630 кВА, напряжение 10 кВ, коэффициент мощности 0,8, коэффициент полезного действия 98 %, потери холостого хода (потери в стали) 1,68 кВт, потери короткого замыкания (потери в обмотках) 7,6 кВт.

В «активном» режиме при мощности 500 кВт потери в обмотках уменьшаются относительно потерь «номинального» режима вследствие уменьшения тока генератора (за счёт исключения реактивной составляющей) и составляют

$$P_{Тм(A)} = P_{см(N)} (I \cos \varphi_{(N)} / I)^2 = 7,6 (0,8)^2 = 4,9 \text{ кВт},$$

где $P_{см(N)}$ – потери в обмотках в «номинальном» режиме; I – ток статора в «номинальном» режиме; $\cos \varphi_{(N)}$ – коэффициент мощности в «номинальном» режиме.

Потери в стали остаются без изменения.

Суммарные потери энергии энергоагрегата (блока «турбина – генератор – трансформатор») составляют $\Delta P_c = 87,1 \text{ кВт}$. КПД энергоагрегата 85,2 %.

Энергоагрегат с асинхронным генератором

Генератор

В качестве генератора рассматривается асинхронный двигатель типа А-13-37-6 [2], работающий в генераторном режиме. Номинальные параметры двигателя следующие: мощность 500 кВт, скорость вращения синхронная 1000 об/мин, напряжение 400 В, частота 50 Гц, коэффициент мощности 0,88, коэффициент полезного действия 93 %.

Скорость вращения ротора

$$n = n_1 / (1 + s),$$

где n_1 – синхронная скорость вращения поля; s – скольжение ротора.

Принимая скольжение ротора при номинальной мощности в двигательном режиме 3,5 % [2, т.1, с. 420], в генераторном режиме соответственно минус 3,5 %, скорость вращения ротора в двигательном номинальном режиме составляет 966 об/мин, а в генераторном номинальном режиме – 1036 об/мин.

Распределение потерь по своим составляющим в номинальном двигательном режиме в процентном выражении (столбец 5 таблицы) принято таким же, как и для синхронного генератора, которое приведено в столбце 2. Расчёт потерь, выполненный для двигателя близких параметров [1, с.477], примерно подтверждает указанное распределение потерь по составляющим.

Механические потери асинхронной машины при скорости 1000 об/мин принимаются такими же, как и для синхронного генератора при скорости 1000 об/мин – 2,6 кВт. Механические потери пропорциональны кубической степени от скорости вращения. Соответственно, механические потери асинхронной машины:

в двигательном номинальном режиме при скорости 966 об/мин:

$$P_{\text{мх}}(\text{АД}) = P_{\text{мх}}(\text{СГ}) (n_{\text{АД}}/n_{\text{СГ}})^3 = 2,6 (966/1000)^3 = 2,3 \text{ кВт},$$

в генераторном номинальном режиме при скорости 1036 об/мин:

$$P_{\text{мх}}(\text{АГ}) = P_{\text{мх}}(\text{СГ}) (n_{\text{АГ}}/n_{\text{СГ}})^3 = 2,6 (1036/1000)^3 = 2,9 \text{ кВт},$$

где $P_{\text{мх}}(\text{СГ})$ – механические потери синхронного генератора при скорости вращения 1000 об/мин; $n_{\text{АД}}$ – скорость вращения асинхронного двигателя; $n_{\text{АГ}}$ – скорость вращения асинхронного генератора; $n_{\text{СГ}}$ – скорость вращения синхронного генератора.

При заданном КПД 93 % суммарные потери составляют 37,6 кВт. Для двигательного номинального режима прочие потери (за вычетом механических потерь) распределены согласно принятому процентному распределению и приведены в столбце 6 таблицы. Они соответствуют также генераторному режиму асинхронной машины и приведены в столбце 7 таблицы.

Гидротурбина

Потери в турбине при использовании асинхронного генератора увеличиваются по сравнению с вариантом использования синхронного генератора. Это происходит вследствие увеличения мощности на валу за счёт увеличения потерь в генераторе и вследствие увеличения скорости турбины из-за скольжения асинхронного генератора. Механические потери в турбине пропорциональны кубической степени от скорости вращения.

Потери в турбине в «номинальном» режиме генератора составляют

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{T}} &= P_{\text{T}} (n_{\text{А}}/n_{\text{С}})^3 (1 - \eta) / \eta = (P_{\text{ГА}} + \Delta P_{\text{ГА}}) (n_{\text{АГ}}/n_{\text{СГ}})^3 (1 - \eta) / \eta = \\ &= (500 + 38,2) (1036/1000)^3 (1 - 0,9) / 0,9 = 66,5 \text{ кВт}, \end{aligned}$$

где P_{T} – мощность на валу турбины; $P_{\text{ГА}}$ – мощность генератора активная; $\Delta P_{\text{ГА}}$ – потери в асинхронной машине в «номинальном» генераторном режиме; $n_{\text{АГ}}$ – скорость вращения асинхронного генератора; $n_{\text{С}}$ – скорость вращения турбины, соответствующая синхронной скорости синхронного генератора; $\eta = 0,9$ – КПД турбины.

Трансформатор

Принимается трансформатор того же типа, что и в случае синхронного генератора, с теми же значениями потерь. Учитывая, что в случае асинхронного генератора в цепи «генератор – трансформатор» протекает полный номинальный ток с коэффициентом мощности 0,8, потери в трансформаторе равны потерям номинального режима (столбец 7 таблицы).

Суммарные потери энергии энергоагрегата (блока «турбина – генератор – трансформатор») составляют $\Delta P_{\text{А}} = 114,0 \text{ кВт}$. КПД энергоагрегата 81,4 %.

Увеличение потерь мощности при использовании асинхронного генератора вместо синхронного составляет

$$\Delta P = \Delta P_{\text{А}} - \Delta P_{\text{С}} = 114,0 - 87,1 = 26,9 \text{ кВт}.$$

Увеличение потерь энергии при использовании асинхронного генератора вместо синхронного в течение года составляет

$$\Delta W = \Delta P \cdot T = 26,9 \text{ кВт} \cdot 8760 \text{ час} = 235644 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Стоимость потерянной энергии за 1 год составляет:

при цене реализации электроэнергии 25 драм / кВт.ч.

$$C_1 = 235644 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \cdot 25 \text{ драм} / \text{кВт} \cdot \text{ч} = 5891000 \text{ драм} (19003 \text{ долл. США});$$

при цене электроэнергии, приобретаемой электросетью от малых ГЭС, установленной решением Комиссии по регулированию общественных услуг РА, – 0,045 долл. США / кВт.ч (14 драм / кВт.ч):

$$C_2 = 235644 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \cdot 14 \text{ драм} / \text{кВт} \cdot \text{ч} = 3299000 \text{ драм} (10642 \$).$$

Примечание. Обменный курс доллара относительно драма по состоянию на февраль 2008 г. – 310 драм / долл.

Цены рассматриваемых электрических машин производства РФ, принимая сугубо условно удельные цены – синхронного генератора 50 долл./кВт, асинхронного двигателя 15 долл./кВт при номинальной мощности машины 500 кВт, составляют:

синхронного генератора – $C_{\text{СГ}} = 500 \text{ кВт} \cdot 50 \text{ долл./кВт} = 25000 \text{ долл.}$;

асинхронного двигателя – $C_{\text{АД}} = 500 \text{ кВт} \cdot 15 \text{ долл./кВт} = 7500 \text{ долл.}$

При использовании асинхронного генератора вместо синхронного стоимость потерянной энергии за 1 год, как следует из приведённого расчёта, соизмерима со стоимостью генератора.

Первоначальный выигрыш в цене асинхронного двигателя относительно синхронного генератора компенсируется за счёт увеличенных потерь асинхронной машины в следующие сроки:

при цене электроэнергии 25 драм / кВт.ч:

$$T_1 = (C_{\text{СГ}} - C_{\text{АД}}) / C_1 = (25000 \text{ долл.} - 7500 \text{ долл.}) / 19003 \text{ долл.} = \\ = 0,92 \text{ года (11 месяцев)};$$

при цене электроэнергии 14 драм / кВт.ч:

$$T_2 = (C_{\text{СГ}} - C_{\text{АД}}) / C_2 = (25000 \text{ долл.} - 7500 \text{ долл.}) / 10642 \text{ долл.} = \\ = 1,64 \text{ года (20 месяцев)}.$$

По прошествии указанных сроков ежегодный ущерб от использования асинхронного генератора составит примерно 76 % (43 %) от стоимости синхронного генератора.

Вывод. Использование асинхронных генераторов вместо синхронных в условиях малых ГЭС нецелесообразно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А.** Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1969. – 632 с.
2. Электротехнический справочник / Под ред. **П.Г. Грудинского** и др. – Т.1. – М.: Энергия, 1974. – 775 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 21.02.2008.

Ժ.Դ. ԴԱՎԻԴՅԱՆ

ՍԻՆԹՐՈՆ ԵՎ ԱՍԻՆԹՐՈՆ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ՀԱՄԵՄԱՏՈՒԹՅՈՒՆՆ ԸՍՏ ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ՓՈՔԸ ՀԷԿ-ԵՐԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ

Հիմնավորվում է, որ սինքրոն գեներատորների փոխարեն ասինքրոն գեներատորների կիրառումը չեն փոքր ՀԷԿ-երի պայմաններում հանգեցնում է օտուրբին - գեներատոր – տրանսֆորմատոր բլոկում կորուստների մեծացմանը շուրջ 30 %-ով, որոնց տարեկան արժեքը համաչափ է գեներատորի արժեքին: Ասինքրոն գեներատորների օգտագործումը սինքրոն գեներատորների փոխարեն փոքր ՀԷԿ-երի պայմաններում նպատակահարմար չէ:

Առանցքային բաներ. ասինքրոն գեներատոր, սինքրոն գեներատոր, էներգիայի կորուստներ, փոքր ՀԷԿ:

J.D. DAVIDYAN

COMPARISON OF SYNCHRONOUS AND ASYNCHRONOUS GENERATORS ON THE LEVEL OF LOSSES IN CONDITIONS OF SMALL HYDROELECTRIC POWER PLANTS

It is shown that the use of asynchronous generators instead of synchronous in conditions of small HPP leads to increase of losses of energy in the block the turbine - the generator - the transformer approximately on 30 % the cost of which during a year is commensurable with the cost of the generator. The use of asynchronous generators instead of synchronous in conditions of small HPP is inexpedient.

Keywords: asynchronous generator, synchronous generator, losses of energy, small HPP.

Ռ.Հ.ՄԻՄՈՆՅԱՆ, Ա. Պ. ԹԱԴԵՎՈՍՅԱՆ, Ա. Գ. ՂՈՒԼՅԱՆ

ՌԱԴԻՈՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՍԱՐՔԱՎՈՐՈՒՄ ՄԱԶԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ
ՉԱՓՄԱՆ ՀԱՄԱՐ

Նկարագրված է սարքավորում, որով հնարավոր է չափել մագի հիմնական ֆիզիկական պարամետրերը /մագի անդրադարձման մեծությունը (գույնի և մակերևութային անհարթության պարամետր) և մագի խզման ժամանակ անհրաժեշտ ուժի և երկարացման մեծությունը մինչև խզվելը (մագի ամրության և ճկունության պարամետր)/ և գնահատել վերջինիս ֆիզիոլոգիական վիճակը:

Առանցքային բառեր. մագ, ամրություն, ճկունություն, երանգ, մոդուլյացիա, փուլային ուղղիչ:

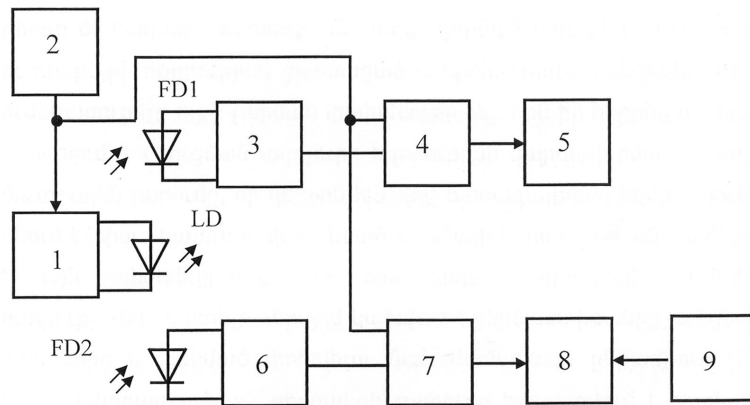
Մարդու և կենդանիների մագերը, որոնք կաշվի եղջերատիպ առաջացումներ են, անցնում են զարգացման երեք հիմնական փուլերով՝ աճի, հետաձման և հանգստի: Առողջ օրգանիզմում մարդու մագերն այս փուլերն անցնում են տարբեր ժամանակ և թափվում են համարյա աննկատ: Մագերի զարգացման փուլերի տևողությունը տարբեր է, տարբեր տիպի մագերի համար [1]. Այսպես, գլխի մագապատված մասի ամենաերկար մագերի համար աճի փուլը տևում է մոտ երեք տարի, հետաճի փուլը 2...3 շաբաթ, իսկ հանգստի փուլը մոտ 3..4 ամիս. Առողջական լավ վիճակի դեպքում մագերի մոտ 85% -ը գտնվում է աճի փուլում, իսկ 14% -ը՝ հանգստյան: Հենց այս տոկոսային հարաբերության դեպքում էլ օրվա ընթացքում մարդու գլխից ընկնում է մոտ 60 մագ: Աճի փուլում գտնվող մագը պոկելիս այն պոկվում է էպիթելային թաղանթի, սոխուկի և նրա տակի մասով, հետաճի փուլում գտնվող մագը պոկվում է էպիթելային թաղանթով, սակայն վերջինիս սոխուկը եղջերացել է և ունի կլորավուն ձև: Հանգստի փուլում գտնվող մագը կաշվից անջատվում է շատ թույլ ձգելու դեպքում (օրինակ՝ սանրվելու ժամանակ), չունի էպիթելային թաղանթ և եղջերային սոխուկ: Նշված փուլերի ժամանակների տևողությունները միջինացված են, խիստ անհատական են, կախված են տարիքից, ներվային համակարգի վիճակից, ներքին սեկրեցիայի գեղձերի գործունեությունից [1]: Մագերն աչքի են ընկնում մեծ ամրությամբ և ճկունությամբ: Բարձր ջերմությամբ և հիմքերով մշակելիս մագը կարող է կորցնել ճկունությունը, իսկ թթուների ազդեցությունից էականորեն չեն փոխում մագի մեխանիկական պարամետրերը: Նշենք նաև, որ որոշ քիմիական նյութերով (անուշադրի սպիրտ, կալցիումական սոդա, օճառ) ազդելու դեպքում փոխվում է մագի կառուցվածքը, ամրությունը և ճկունությունը:

Մագերի գույնը կախված է մագի սոխուկում գտնվող պիգմենտների (մելանոցիտների) ակտիվությունից և տարատեսակներից: Մարդու տարիքի աճի հետ պիգմենտների քանակը պակասում է, մագերը զրկվում են գունավոր նյութից և սպիտակում են: Հասկանալի է, որ մագերի գույնը, փայլը, ճկունությունը, ամրությունը կախված են նաև մագը ներկող և լաքապատող նյութերից:

Հետևություն. մազի ֆիզիկական վիճակի գնահատման համար բավարար է օգտագործել այնպիսի պարամետրեր, ինչպիսիք են մազի անդրադարձման ունակությունը և մազի խզման համար անհրաժեշտ ուժի մեծությունը: Ակնհայտ է, որ մինչ խզվելը տեղի ունի մազի երկարացում, որի չափն էլ կարող է գնահատել մազի ճկունության աստիճանը:

Մեր առաջարկած՝ մազի ֆիզիկական պարամետրերը գնահատող և չափող սարքը բաղկացած է երկու հիմնական հանգույցներից՝ մազի անդրադարձման մեծության չափման հանգույց (գունային երանգը գնահատելու համար) և խզման համար անհրաժեշտ ուժի չափման հանգույց, որը ծառայում է նաև մազի ճկունությունը գնահատելու համար:

Մազի անդրադարձման մեծության չափման համար որպես հիմք ընդունվել է նկ. 1-ում պատկերված կառուցվածքային սխեման:



Նկ. 1

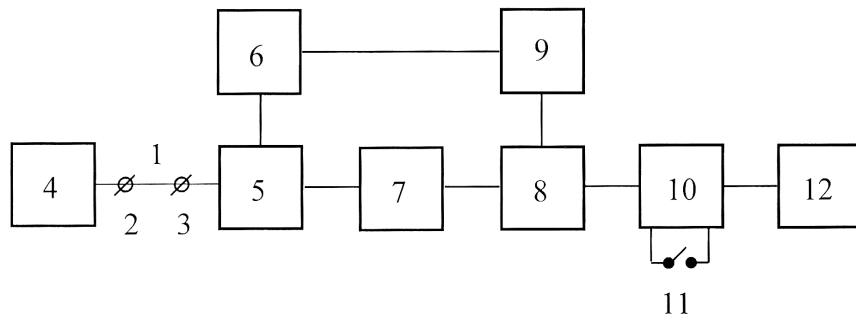
Անդրադարձման մեծության չափումը կատարվում է հետևյալ կերպ. LD դիոդի ճառագայթի նեղ փունջը բաժանվում է երկու մասի, մի մասն ընկնում է ճառագայթի հզորության կայունացման շղթայի FD2 ֆոտոդիոդի ընդունիչ լուսամուտի, իսկ մյուսը՝ անդրադարձման ունակության չափման շղթայի FD1 ֆոտոդիոդի ընդունիչ լուսամուտի վրա: Ճառագայթի հզորությունը կայունացվում է հոսանքի իմպուլսների ամպլիտուդի փոփոխման միջոցով: FD2 դիոդի ելքում ունենք ուղղանկյունաձև իմպուլսներ, որոնց ամպլիտուդը որոշվում է LD դիոդի ճառագայթի հզորությամբ: Այս միաբևեռ իմպուլսները ուժեղացվում են փոփոխական հոսանքի 6 ուժեղացուցիչով [2,3], ձևափոխվում են ամպլիտուդային արժեքին համապատասխան լարումով 7 փուլային ուղղիչով և տրվում 8 դիֆերենցիալ ուժեղացուցչի մի մուտքին, իսկ մյուս մուտքին տրվում է 9 լարման կայունացված աղբյուրի ելքային լարումը: 8 դիֆերենցիալ ուժեղացուցչի ելքային լարումը, որը 7 և 9 հանգույցների ելքային լարումների տարբերության ուժեղացված արժեքն է, տրվում է LD դիոդի ճառագայթի հզորության կարգավորման մուտքին: LD դիոդի ճառագայթի հզորության ցանկացած փոփոխություն հանգեցնում է 6 ուժեղացուցչի ելքի լարման փոփոխությանը, որն իր հերթին այնպես է փոխում 1 սնուցման աղբյուրի հզորության կարգավորման շղթայի մուտքային լարումը, որ վերջին հաշվով ճառագայթման հզորությունը մնում է խիստ

կայունացված: Նման սխեմայի կիրառումն անհրաժեշտ է այն տեսանկյունից, որ ճառագայթող դիոդների ելքային հզորությունը նկատելի կերպով կախված է ջերմաստիճանից, անցնող հոսանքից և հակված փոխվելու նաև ժամանակի ընթացքում [2]: Մազի անդրադարձման գործակցի չափումը կատարվում է հետևյալ կերպ. LD դիոդից ճառագայթն ընկնում է չափման ենթակա մազի վրա, ըստ որում՝ ապահովվում է մազի ճշգրիտ սևեռումն այնպես, որ ճառագայթն ընկնի 90°- անկյան տակ, ուղիղ ձգված մազի առանցքի նկատմամբ: Մազից անդրադարձված ճառագայթն ընկնում է FD1 դիոդի ընդունիչ պատուհանի վրա: Առաջացած բաբախող միաբևեռ հոսանքն ուժեղացվում է փոփոխական հոսանքի 3 լարման ուժեղացուցիչի [2] միջոցով և ձևափոխվում է հաստատուն լարման 4 սինխրոն փուլազգայուն ուղղիչի միջոցով և չափվում է սարքում տեղադրված թվային 5 վոլտմետրի միջոցով: 4 և 7 փուլային ուղղիչների համար որպես հենակային աղբյուր (փուլի համար) օգտագործվում է 2 մոդուլացնող գեներատորի ելքային լարումը: LD ճառագայթող դիոդի կայունացված հզորության մակարդակը փոխելու համար ծառայում է 9 հաստատուն լարման կարգավորվող աղբյուրը, որի լարումը փոխելիս փոփոխվում է LD դիոդի ճառագայթվող հզորությունը՝ դրանով իսկ ապահովելով LD դիոդի ելքի նախընտրելի հզորությունը:

Մազի խզման ուժը չափվում է նկ. 2 – ում պատկերված կառուցվածքային սխեմայի համաձայն: Չափման ենթակա 1 մազը միացվում է 2 և 3 սեղմակների մեջ: 4 մեխանիկական հանգույցի միջոցով մազը ձգվում է և, միաժամանակ, չափվում է ձգման հետևանքով առաջացած մազի երկարության փոփոխման մեծությունը: Ձգման ուժի մեծությունը չափվում է 5 թենզոմետրիկ կամրջակի միջոցով, որի ուժաչափիչ դիմադրություններն ամրացված են ածխածնային պողպատից պատրաստված օվալաձև զսպանակի վրա: Կամրջակի սնուցումը կատարվում է 6 բաբախող կայունացված ամպլիտուդով հոսանքի միջոցով, որի բաբախող ռեժիմն ապահովելու համար կիրառվում է ուղղանկյուն իմպուլսների 9 գեներատորը: 5 կամրջակի ելքային լարումը ուժեղացնելով 7 դիֆերենցիալ ուժեղացուցիչով, ձևափոխվում է հաստատուն լարման 8 փուլազգայուն ուղղիչով, որի ղեկավարման համար օգտագործվում է 9 գեներատորի ելքային լարումը: 8 փուլազգայուն ուղղիչի ելքային լարումը տրվում է 10 ծայրագույն արժեքը հիշող հանգույցի մուտքին: Վերջինս ունի աշխատանքային երկու ռեժիմ: I ռեժիմում մուտքի լարումն անմիջապես տրվում է ելք՝ վոլտմետրով չափելու համար (այս դեպքում 11 անջատիչը փակ է): II ռեժիմում 10 հանգույցի ելքային լարումը ճշգրտորեն հետևում է մուտքային լարմանը և այդ լարումը փոքրանալու դեպքում հանգույցի ելքում մնում է (հիշվում է) մուտքի լարման առավելագույն արժեքը (այս ռեժիմում II անջատիչը բաց է), իսկ 12 վոլտմետրը չափում է այդ առավելագույն արժեքը (խզման ուժը) [4]:

Մազի խզման ուժի չափումը սարքի միջոցով կատարվում է հետևյալ կերպ. մազը 2 և 3 սեղմակներին ամրացնելուց հետո 4 հանգույցի միջոցով աստիճանաբար ձգվում է մինչև խզվելը: Մկզբում, երբ ձգող ուժն ունի համարյա 0 - ական արժեք (մազը դեռ գտնվում է ազատ կախված վիճակում) 5 կամրջակը հավասարակշռված է, իսկ ելքում լարումը բացակայում է: Մազի ձգվելու հետևանքով դեֆորմացվում են օվալաձև զսպանակները, փոխվում են թենզոմետրիկ կամրջակի դիմադրությունների մեծությունները, և կամրջակի ելքում հայտնվում է լարում, որը համեմատական է մազը ձգող ուժի մեծությանը: Այս լարումն ուժեղացվում է 7 ուժեղացուցիչով, 8 փուլային ուղղիչով և չափվում 12 վոլտմետրով: Մազը խզելու համար անհրաժեշտ ուժի

մեծության չափման համար 11 անջատիչը դրվում է բաց վիճակի և 10 ծայրագույն արժեքը հիշող հանգույցի ելքում ստացված լարման մեծությունը համապատասխանում է ուժի այն առավելագույն արժեքին, որը հանգեցրել էր մագի խզմանը և որը չափվում է 12 վոլտմետրով: Մագի երկարացման մեծության չափումը ձգող ուժի ազդեցության տակ կատարվում է 4 ձգող հանգույցի միջոցով, որի ելքի լարումը համեմատական է մագի երկարացմանը (նկ. 2 – ում ելքը ցույց չի տրված):

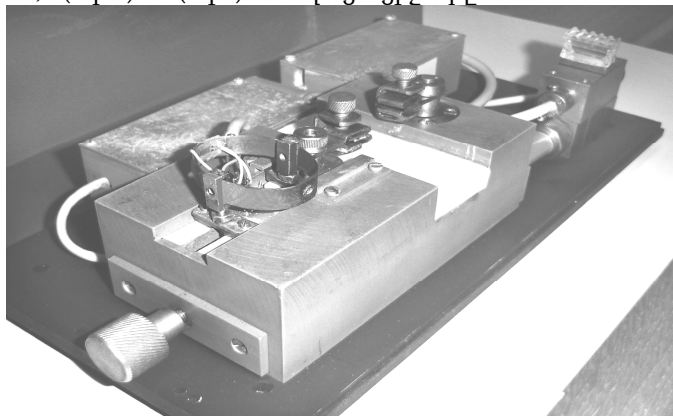


Նկ. 2

Մուտքի միջոցով չափված բոլոր պարամետրերը հաստատուն լարումների ձևով կարող են գրանցվել կամ չափվել արտաքին սարքերի միջոցով՝ օգտագործելով սարքի համապատասխան ելքային սեղմակները: Օրինակ՝ օգտագործելով երկու մուտք ունեցող գրանցող սարք, կարելի է ստանալ մագի ձգման գործընթացում երկարացման կախվածությունը ձգող ուժի մեծությունից, որը տեղեկություն է պարունակում մագի ճկունության և ամրության վերաբերյալ:

Սարքը բաղկացած է երկու հիմնական մասերից. չափող, սնուցող և կառավարող մաս և չափիչ խցիկ, որը պարունակում է չափումների անհրաժեշտ բոլոր օպտիկական և մեխանիկական հանգույցները:

Նկ. 3-ում պատկերված է չափիչ խցիկի արտաքին տեսքը, որտեղ որոշակիորեն երևում են օվալաձև զսպանակը թենզոտվիչներով, մագի ամրացման համար նախատեսված սեղմակները, մագը ձգելու մեխանիզմի բռնակը, մագի գունային երանգի որոշման օպտիկական համակարգը, ինչպես նաև մետաղյա տուփերը, որտեղ տեղավորված են 3,6 (նկ. 1) և 7(նկ.2) ուժեղացուցիչները:



Նկ.3

Սարքի հիմնական տեխնիկական պարամետրերն են.

- խզման ուժի չափման տիրույթը՝ 0...250 գր. ուժ,
- խզման ուժի չափման սխալը՝ $\leq 3\%$,
- մազի երկարացման մեծության տիրույթը՝ 0...20 մմ,
- մազի երկարացման չափման սխալը՝ $\leq 0,1$ մմ,
- ճառագայթի անդրադարձման գործակիցը՝ (0-200) (10^{-6}):

Բոլոր պարամետրերը չափվում են նաև սարքում տեղադրված թվային 3, 5 կարգ ունեցող վոլտմետրով: Սարքի բոլոր հանգույցների սնուցումը կատարվում է կայունացված լարման աղբյուրներից, բոլոր փուլային ուղղիչները իրացված են սինիսթրոն – կուտակող տիպի, իսկ ծայրագույն արժեքի մեծությունը չափվում է [4] արտոնագրի համաձայն:

Սարքը կարող է լայն կիրառություն գտնել մազերի համար դեղամիջոցներ արտադրողների և օգտագործողների կողմից, մաշկի հիվանդությունների ախտորոշման, մազածածկույթի աճի ֆունկցիոնալ խախտումների ախտորոշման համար, ինչպես նաև դատաբնական փորձագիտության մեջ՝ մազերի նույնացման աշխատանքներում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Jarett A.** The physiology and pathophysiology of the skin. - London, Academia Priss, 1973-1977. - V 1-4
2. **Хоровиц П., Хилл У.** Искусство схемотехники. Т. 1.- М.: Мир, 1982. - 598с.
3. **Титце У., Шенк К.** Полупроводниковая схемотехника. - М.: Мир, 1982. - 512 с.
4. А. с. СССР, N1628002. Устройство для измерения экстремального значения / **Р.А. Симонян, Т. Д. Торикян.** – Опубл. 1990.

ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի ինստիտուտ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 14.07.2007.

Р.А. СИМОНЯН, А. П. ТАДЕВОСЯН, А.Г. ГУЛЯН РАДИОФИЗИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОС

Описано устройство, способное измерить основные физические параметры волос для оценки их физиологического состояния. К ним относятся отражательная способность и величина силы для разрыва волос, а также величина удлинения при натяжении до разрыва.

Ключевые слова: волос, крепкость, эластичность, цвет, модуляция, фазовый детектор.

R.H. SIMONYAN, A. P. TATEVOSYAN, A. G. GHULYAN RADIOPHYSICAL DEVICE FOR HAIR PARAMETERS MEASUREMENT

A devise is discribed, which will make it possible to measure the main physical parameters of the hair and to assess the physiological state, that is hair reflection value (color and surface roughness parameters), the value of hair- breaking and it, lengthening till it breaks (hair strenght and flexibility parameter). The device may find application in production and consumption of the hair-care remedies, as well as in forensic practice for hair identification.

Keywords: hair, strenght, flexibility, shade, modulation, phase detector.

Г.М. ТРАВАДЖЯН

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА ВЕЛИЧИНУ ИСКУССТВЕННОЙ ИНДУКТИВНОСТИ

Рассмотрены резонансные характеристики предложенной нами ранее схемы искусственной индуктивности. Предложена методика определения эквивалентной емкости схемы и получены экспериментальные зависимости величины эквивалентной индуктивности от параметров RC цепи обратной схемы. Показана возможность управления характеристиками индуктивного элемента путем изменения геометрических параметров, в частности, ширины затвора МОП резисторов и конденсаторов. Получено удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных характеристик.

Ключевые слова: искусственная индуктивность, схема, обратная связь, МОП конденсатор, резистор, резонанс, частота, ширина затвора, приведенная площадь.

Введение. В настоящее время в связи с бурным развитием информационной и телекоммуникационной технологий резко возрос интерес к реализованным на едином чипе радиочастотным (РЧ) интегральным схемам. Уже созданы [1] различные монолитные РЧ узлы (малошумящие усилители, управляемые напряжением генераторы, смесители, согласующие схемы и т.д.) по кремниевой МОП (металл-окисел-полупроводник) технологии. В то же время для РЧ проектов, помимо активных транзисторов, желаемые характеристики схем не в меньшей степени зависят от параметров пассивных схемных компонентов. В особенности монолитные индуктивные катушки (ИК) являются наиболее критичными компонентами в современных радиочастотных проектах смешанных аналоговых сигналов.

ИК на чипе в виде спиралей различных конфигураций могут быть изготовлены по традиционной комплементарной металл-окисел-полупроводник (КМОП) технологии с незначительной модификацией проектных топологических норм. При проектировании спиральных ИК наиболее критичным фактором является оптимизация добротности на рабочей частоте. При этом определение геометрии и площади спирали ИК, требуемых для получения оптимизированных значений добротности Q на рабочей частоте, не является прямым (непосредственным) процессом. Наиболее трудным фактором процесса проектирования реальных высокодобротных ИК является минимизация влияния паразитных элементов (паразитные сопротивления и емкости) структуры. Кроме того, на высоких частотах скин-эффект становится причиной неоднородного распределения тока в металлических сегментах спирали, что приводит (помимо других факторов) к частотно-зависимому распределению паразитного сопротивления, а вызванные эффектом Фарадея электромагнитные явления индуцируют паразитные токи (вихревые токи) в кремниевой подложке, что приводит к дополнительной частотной зависимости паразитного сопротивления. Последнее может быть модулировано как методами проектирования (компромисс между площадью ИК и шириной металлических линий

спирали), так и технологическими методами (увеличение толщины металлического слоя или слоя SiO_2).

Индукцированные емкостные потери обусловлены емкостью между ИК и полупроводниковой подложкой и потерями энергии в самой подложке. Результирующее рассеивание энергии добавляет активную составляющую в мнимую часть индуктивного импеданса, и, таким образом, добротность уменьшается. Минимизировать эту емкость обычно удается удалением ИК по возможности дальше от подложки, разместив ее, например, на верхнем слое металлической многоуровневой разводки. Для снижения уровня индуцированных потерь в подложке разработано несколько методов [2,3], включающих твердотельные и заземленные экраны различных конфигураций, многоуровневую металлизацию для построения вертикальных соленоидов, а также минимизацию уровня легирования подложки под ИК. Последние достижения в технологии цифровых КМОП схем также дают значительные преимущества, в частности, добротность ИК увеличивается в четыре раза по сравнению с традиционным оксидным методом.

Таким образом, создание индуктивных элементов с высокой добротностью является одной из трудноразрешаемых проблем в микроэлектронной технологии при изготовлении полупроводниковых ИС. В этом плане поиск новых методов и способов реализации ИК с требуемыми параметрами представляет перспективную и актуальную исследовательскую задачу.

Несмотря на определенные трудности и учитывая важность проблемы, работы по улучшению параметров интегральных спиральных ИК интенсивно продолжаются. Одновременно рассматриваются и другие альтернативные возможности создания индуктивного эффекта, основанные на отличающихся физических принципах и схемотехнических решениях. В частности, полупроводниковые р-п переходы и биполярные транзисторные структуры проявляют свойства нелинейных индуктивностей [4]. Реактивная часть полного сопротивления структур рассматривается как индуктивность. Численные расчеты показывают, что значения индуктивности, добротности и активного сопротивления ИК сильно зависят от электрофизических параметров структуры и частоты сигнала.

Индуктивный эффект наблюдается и в схемах с обратной связью [5]. В работе [6] нами предложена схема и исследована возможность реализации индуктивного эффекта, основанного полностью на современной интегральной МОП технологии. Показано, что эквивалентная реактивная составляющая импеданса схемы имеет индуктивный характер и должна зависеть от сопротивления и емкости RC цепи обратной связи, также реализованной на МОП транзисторах. Отличительной особенностью предложенной схемы является возможность использования МОП транзистора в качестве типового схемного элемента. Такой вариант создания индуктивного эффекта в технологическом и схемотехническом плане совместим с современной кремниевой МОП технологией. Исследованы также характеристики саморезонанса разработанной схемы [7]. Установлена количественная связь между частотой саморезонанса схемы и шириной затвора МОП транзистора. Анализ амплитудно-частотных, фазочастотных и токовых характеристик позволяет вычислить важные параметры схемы искусственной индуктивности, в частности, эквивалентную и собственную добротность контура, оценить значения

сопротивления потерь и эквивалентное сопротивление и, что очень важно, величину искусственной индуктивности контура [8]. Показано, что для проектирования высокочастотных резонансных контуров на основе предложенной схемы необходимо выбрать оптимальное соотношение между избирательностью и требуемым уровнем выходного напряжения схемы путем регулирования геометрических и электрических параметров МОП транзисторов исходной схемы искусственной индуктивности.

Таким образом, можно утверждать, что предложенный подход применительно к микроэлектронным схемам позволит в принципе создать в едином чипе пассивные и активные компоненты с заданными электрическими параметрами.

В данной работе рассматриваются некоторые характеристики схемы искусственной индуктивности в зависимости от параметров элементов RC цепи обратной связи. Исследованы резонансные характеристики и определено влияние изменения значений параметров отдельных компонентов на характеристики схемы искусственной индуктивности.

Эксперимент. Резонансные характеристики схемы искусственной индуктивности исследованы в широком диапазоне изменения сопротивления и емкости (ширины затвора МОП конденсатора) RC цепи обратной связи. Моделирование схемы проведено для 90 нм МОП технологии с помощью программы HSPICE моделирования интегральных схем.

Для оценки величины собственной эквивалентной емкости схемы предложена методика, основанная на исследовании АЧХ схемы. Собственная резонансная f_0 частота контура $f_1 = 1/2\pi\sqrt{L_э C_э}$, где $L_э$ и $C_э$ - соответственно эквивалентная индуктивность и емкость схемы искусственной индуктивности (рис.1).

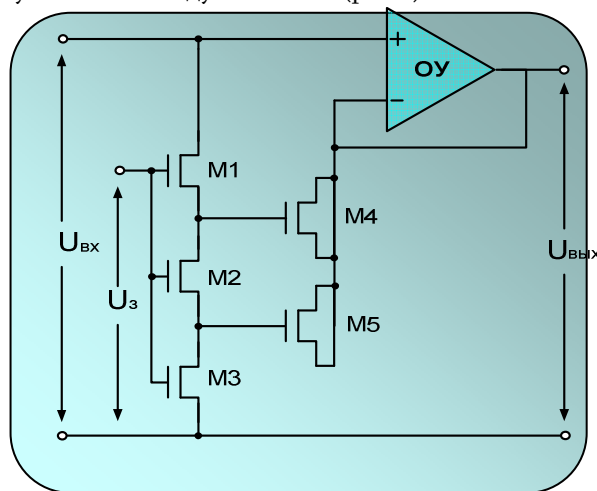


Рис.1. Схема искусственной индуктивности

При подключении к входной цепи схемы внешней емкости C_B резонансная частота уменьшается и становится равной $f_1 = 1/2\pi\sqrt{L_3(C_3 + C_B)}$. После простых преобразований получим выражение, позволяющее вычислить эквивалентную емкость контура при известном C_B и по измеренным значениям f_0 и f_1 :

$$\frac{f_0^2}{f_1^2} = 1 + \frac{C_B}{C_3}.$$

При условии $C_3 = C_B$ $f_1 = f_0/\sqrt{2}$, следовательно, можно определить эквивалентную емкость резонансной схемы.

На рис.2 представлена зависимость частоты резонанса от величины внешней емкости при заданном значении ширины затвора (эквивалентно емкости) МОП конденсатора в цепи обратной связи. Зависимость получена на основе представленных на рис.3 АЧХ схемы при различных значениях C_B . При заданных параметрах схемы (ширины затвора МОП конденсатора, сопротивления в цепи обратной связи и т.д.), как следует из рис.2, определенная по приведенной методике эквивалентная C_3 емкость составляет 80 пФ.

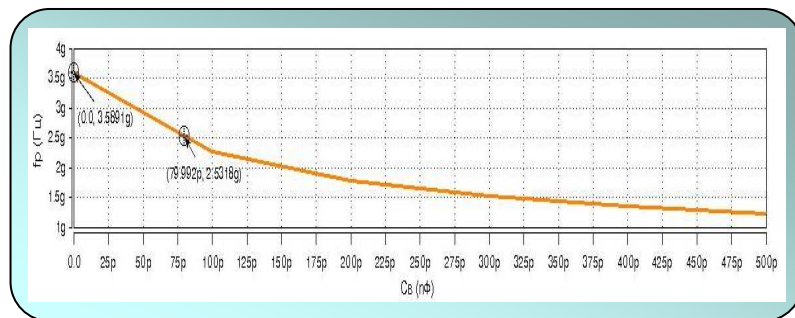


Рис.2. Зависимость частоты резонанса от величины внешней емкости C_B

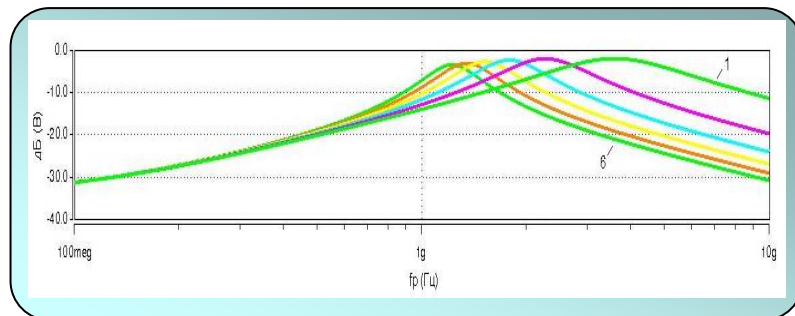


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика при различных значениях C_B
($C_1=0$, $C_6=500$ пФ, шаг изменения емкости $\Delta C=100$ пФ)

Аналогичным образом вычислены значения эквивалентной емкости при различных значениях ширины затвора МОП конденсатора и построена зависимость (рис.4) этой емкости от величины параметра приведенной площади S/S_0 затвора. S_0 соответствует величине максимальной площади затвора МОП конденсатора для данной серии моделирования. Таким образом, ширина затвора МОП конденсатора является эффективным геометрическим параметром, в частности, для регулирования частоты резонанса схемы через величину эквивалентной емкости.

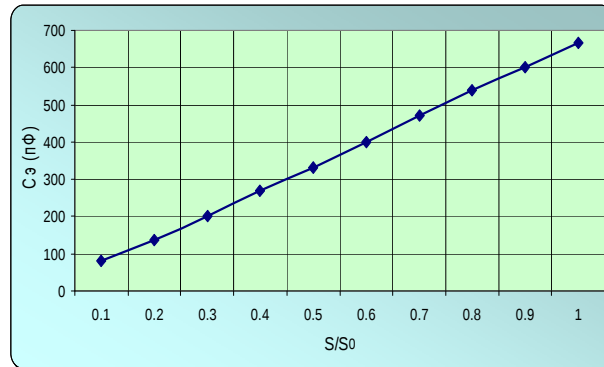


Рис.4. Зависимость эквивалентной емкости схемы от параметра приведенной площади S/S_0 затвора

Исследование влияния сопротивления в цепи обратной связи на характеристики схемы показало, что увеличение R в широком диапазоне приводит к уменьшению резонансной частоты схемы. Следовательно, постоянная времени RC цепи обратной связи является эффективным параметром контроля резонансных параметров схемы искусственной индуктивности. Понижение резонансной частоты обычно производится увеличением постоянной времени RC цепи, т.е. увеличением ее полной емкости или сопротивления. В первом случае увеличивается площадь, занимаемая МОП конденсатором, что, следовательно, приводит к снижению плотности интеграции схемы. Во втором случае ухудшаются условия согласования схемы с нагрузкой.

Ранее [5-7] нами было показано, что схему искусственной индуктивности можно представить эквивалентным параллельным колебательным контуром, следовательно, на частоте резонанса f_p эквивалентную индуктивность $L_э$ схемы можно вычислить по известной формуле

$$L_э = 1/4\pi^2 f_p^2 C_э.$$

По значениям эквивалентной емкости схемы (рис.4) и полученным из АЧХ экспериментальным данным частоты резонанса можно вычислить значения искусственной индуктивности в зависимости от параметров RC цепи обратной связи. На рис. 5 и 6 представлены соответствующие зависимости величины эквивалентной индуктивности от геометрических параметров, в частности, при различных сочетаниях приведенной площади S/S_0 затвора и сопротивления R .

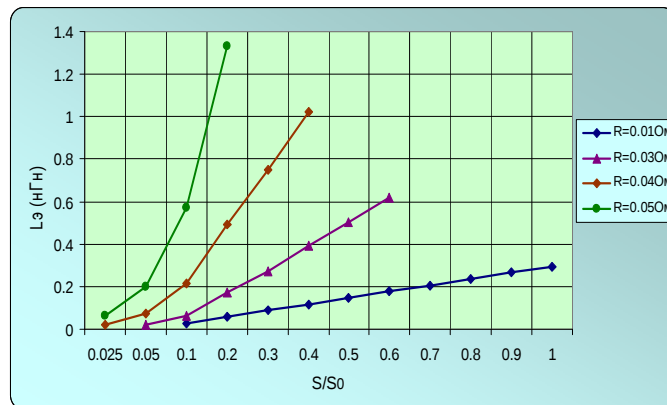


Рис.5. Зависимость эквивалентной индуктивности схемы от параметра приведенной площади S/S_0 затвора при различных значениях R

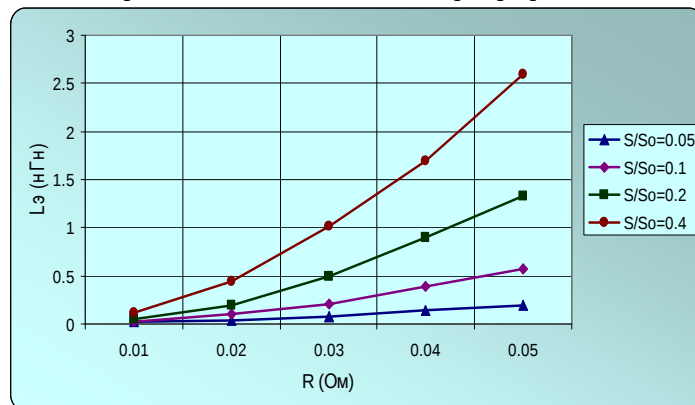


Рис. 6. Зависимость эквивалентной индуктивности схемы от величины сопротивления R обратной цепи при различных значениях параметра приведенной площади S/S_0 затвора

Из рис. 5 и 6 видно, что больших значений искусственной индуктивности $L_э$ можно достичь увеличением как емкости, так и сопротивления цепи обратной связи. Однако, как показывают предварительные исследования, такого увеличения $L_э$ можно достичь лишь за счет уменьшения приведенной добротности схемы.

Заключение. Проведенный анализ и численное моделирование показывают, что путем варьирования параметрами элементов схемы обратной связи появляется возможность управлять различными характеристиками индуктивного элемента, включающими фиксированные значения индуктивности, минимальную резонансную частоту, минимальное или максимальное значения добротности. Кроме того, становится реальной схемно-конструкторская оптимизация проекта ИК в зависимости от конкретных условий схемного применения индуктивности. Полученные экспериментальные зависимости позволяют также определить аналитические зависимости для эквивалентной индуктивности $L_э$ (по возможности и добротности) и тем самым построить математическую модель оптимизационной задачи проектирования ИК.

Экспериментальные зависимости хорошо соответствуют приведенным в [6] тенденциям теоретической модели искусственной индуктивности схемы, согласно которым теоретическая зависимость изменения индуктивности схемы имеет вид $L \approx 4R^2C$. На рис.7 в качестве примера показана теоретическая зависимость величины искусственной индуктивности L_3 от параметра приведенной площади.

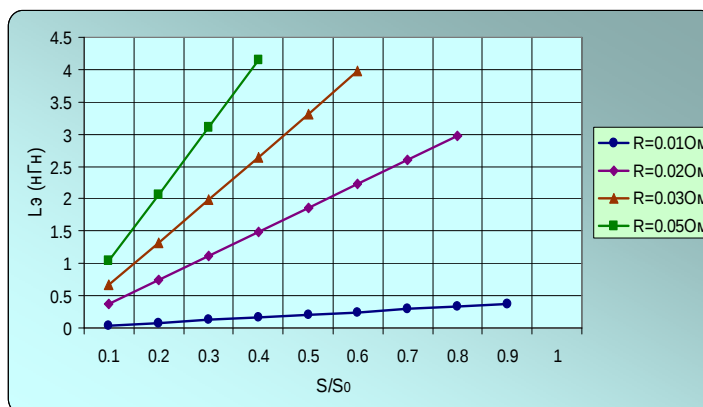


Рис.7. Теоретическая зависимость эквивалентной индуктивности схемы от параметра приведенной площади S/S_0 затвора при различных значениях R

Отметим, что теоретическое выражение L_3 получено при условии пренебрежения потерями в индуктивном элементе. Кроме того, оно не учитывает некоторые схемотехнические особенности реализации ИК. Следовательно, сравнение данных на рис.5 и 7 показывает удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных характеристик.

Таким образом, современный уровень развития кремниевой МОП технологии и полученные в работе результаты позволяют надеяться, что в результате дальнейшего совершенствования предложенный подход может быть использован для реализации индуктивных элементов на чипе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rogers J., Plett C.** Radio frequency integrated circuit design// Artech House.- 2003.- P.410.
2. **Su C., Chen L., Chang S.** A macro model of silicon spiral inductor // Solid- State Electronics.- 2002.- 46.- P. 759-767.
3. **Yue C.P., Wong S.S.** On-Chip Spiral Inductors with Patterned Ground Shields for Si-based RF ICs // IEEE Journal of Solid-State Circuits.-1998.- V.33, N 5.- P.743- 751.
4. **Aroutiounian V.M., Gasparyan F.V.** To the theory of small-signal characteristics of $p^+ -n- n^+$ structures, based on semiconductors // Electron Technology.- 1980.-13, 3.- P. 53-59.

5. **Aroutiounian V.M., Buniatyan V.V., Sargsyan A.V.** High temperature superconducting thin film circuit parameters // Proceedings of SPIE.- 2001.- V.4490.- P.168-176.
6. **Buniatyan V.V., Travajyan G.M., Asatryan A.H.** Artificial inductor effect on MOS transistors // Semiconductor Micro-and Nanoelectronics: Proceedings of the sixth international conference, Tsakhcadzor.- Sept. 2007.-P. 161-164.
7. **Բունիաթյան Վ.Վ., Տրավաջյան Գ.Մ.** Արհեստական ինդուկտիվության ինքնառեզոնանսի բնութագրերը // ՀՊՀՀ (Պոլիտեխնիկ) ԼՐԱԲԵՐ-75: Գիտական և մեթոդական հոդվածների ժողովածու. Մաս 1. - Երևան, 2008. - Էջ 431- 434:
8. **Буниатян В.В., Траваджян Г.М.** Исследование характеристик электронной схемы искусственной индуктивности // Вестник ГИУА. Сер. Моделирование, оптимизация, управление. - 2007. - Вып.10, т. 2. - С. 35- 41.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.11.2007.

Գ.Մ. ՏՐԱՎԱԶՅԱՆ

ՀԵՏԱԴԱՐՁ ԿԱՊԻ ԵՂԹԱՅԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆ ԱՐԶԵՍՏԱԿԱՆ ԻՆԴՈՒԿՏԻՎՈՒԹՅԱՆ ՄԵԾՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ

Դիտարկված են մեր կողմից առաջարկված արհեստական ինդուկտիվության սխեմայի ռեզոնանսային բնութագրերը: Առաջարկված է սխեմայի համարժեք ունակության որոշման համեմատաբար պարզ մոտեցում: Ստացվել են արհեստական ինդուկտիվության մեծության փորձնական կախվածությունները հետադարձ կապի RC սխեմայի պարամետրերից: Ցույց է տրված ինդուկտիվության տարրի բնութագրերի կառավարման հնարավորությունը ՄՕԿ ռեզիստորների և կոնդենսատորների երկրաչափական պարամետրերի, մասնավորապես փականի լայնության փոփոխման միջոցով: Ստացվել է տեսական և փորձնական բնութագրերի բավարար համապատասխանություն:

Առանցքային բառեր. արհեստական ինդուկտիվություն, սխեմա, հետադարձ կապ, ՄՕԿ կոնդենսատոր, ռեզիստոր, ռեզոնանս, հաճախություն, փականի լայնություն, բերված մակերես:

G.M. TRAVAJYAN

INFLUENCE OF PARAMETERS OF THE FEEDBACK CIRCUIT ON ARTIFICIAL INDUCTANCE

The resonant characteristics of the artificial inductance circuit are discussed. The relatively simple approach is offered to determine the equivalent circuit capacitance. The experimental dependences of artificial inductance on feedback RC chain parameters are obtained. The possibility to control the inductive element characteristics by the variation of MOS resistor and capacitor geometrical parameters, particularly by the gate width is shown. The tolerable agreement of theoretical and experimental characteristics are obtained.

Keywords: artificial inductance, circuit, resonance, frequency, feedback, MOS resistor and capacitor, gate width, normalized area.

С.О. СИМОНЯН, А.Г. АВЕТИСЯН, А.С. СИМОНЯН

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОБОБЩЕННЫХ
ОБРАТНЫХ МАТРИЦ [I]**

Предложен простой метод определения параметрических обобщенных обратных матриц на основе дифференциальных преобразований Г. Е. Пухова.

Ключевые слова: параметрические обобщенные обратные матрицы, дифференциальные преобразования, численно-аналитические решения.

Введение. Обобщенные обратные матрицы широко используются в различных областях научных и практических исследований. Для определения обобщенных обратных числовых матриц известно множество методов [1-3]. В то же время для определения обобщенных обратных параметрических матриц основным подходом является метод замороженных коэффициентов (МЗК) [4], обладающий невысокой точностью вычислений [5], и методы определения обобщенных обратных матриц только для частных случаев (в основном для полиномиальных матриц [6-8]). В последнее время для решения рассматриваемой задачи разработан ряд методов, основанных на дифференциальных преобразованиях [9], и для каждого из них получены соответствующие вычислительные характеристики, позволяющие осуществлять их обоснованный выбор при решении конкретных задач [10-15]. В настоящей работе предлагается новый численно-аналитический метод определения обобщенных обратных параметрических матриц, отличающийся от вышеупомянутых методов сравнительной простотой при его машинной реализации и достаточно высокой точностью.

Математический аппарат. Пусть по аналогии свойств обобщенных обратных числовых матриц $X_{n \times m}$ при матрицах $A_{m \times n}$ [1,2] имеют место следующие условия Мура-Пенроуза для параметрических матриц $X(t)_{n \times m}$ (где параметр t , в частном случае, может быть временем) при матрицах $A(t)_{m \times n}$:

$$A(t) \cdot X(t) \cdot A(t) = A(t), \quad (1)$$

$$X(t) \cdot A(t) \cdot X(t) = X(t), \quad (2)$$

$$(A(t) \cdot X(t))^* = A(t) \cdot X(t), \quad (3)$$

$$(X(t) \cdot A(t))^* = X(t) \cdot A(t), \quad (4)$$

где знак $*$ означает комплексное сопряжение и транспонирование. Ясно, что при действительных параметрических, в частности неавтономных матрицах $A(t)$, знак $*$ заменяется знаком транспонирования T .

По аналогии со свойствами обобщенных обратных числовых матриц [2], параметрическая обобщенная обратная матрица называется:

- а) g -обратной для $A(t)$ (обозначается через $A^-(t)$), если выполняется условие (1);
- б) рефлексивной g -обратной для $A(t)$ (обозначается через $A_R^-(t)$), если выполняются условия (1) и (2);
- в) g -обратной со свойством наименьших квадратов (обозначается через $A_L^-(t)$), если выполняются условия (1) и (3);
- г) g -обратной со свойством минимальной нормы (обозначается через $A_M^-(t)$), если выполняются условия (1) и (4);
- д) g -обратной Мура-Пенроуза для $A(t)$ (обозначается через $A^+(t)$), если выполняются условия (1) - (4).

Тогда для матриц $A(t)$ и $X(t)$ может иметь место одно из следующих парных условий:

$$A(t) \cdot X(t) = E_{m \times m}, X(t) \cdot A(t) = E_{n \times n} \quad (5)$$

(при этом, очевидно, $m = n$ и, следовательно, $X(t) \equiv A^{-1}(t)$),

$$A(t) \cdot X(t) = E_{m \times m}, X(t) \cdot A(t) \neq E_{n \times n}; \quad (6)$$

$$A(t) \cdot X(t) \neq E_{m \times m}, X(t) \cdot A(t) = E_{n \times n}; \quad (7)$$

$$A(t) \cdot X(t) \neq E_{m \times m}, X(t) \cdot A(t) \neq E_{n \times n}. \quad (8)$$

Для построения искомой параметрической обобщенной обратной матрицы $X(t)$ при центре аппроксимации t_v воспользуемся дифференциальными преобразованиями [9]

$$X(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial^K x(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \text{---} \quad x^D(t) = \mathfrak{K}(t, t_v, H, X(K)), \quad (9)$$

где $X(K)$ – изображение (дискрета) оригинала $x(t)$ – функция целочисленного аргумента $K = \overline{0, \infty}$; H – некоторая постоянная (масштабный коэффициент), которая вводится с целью выравнивания размерностей слагаемых оригинала и обеспечения возможности их суммирования; --- – знак перехода из области оригиналов в область изображений и наоборот; $\mathfrak{K}(\cdot)$ – некоторая функция, обуславливающая восстановление оригинала $x(t)$.

I. В основе предлагаемого метода сначала положим исходное соотношение (2), т.е.

$$X(t) \cdot A(t) \cdot X(t) = X(t). \quad (10)$$

С учетом условий (5)-(8) рассмотрим следующие четыре возможных случая, оперируя в каждом конкретном случае для определения матричных дискрет $X(K)$, $K = \overline{0, \infty}$ обобщенных обратных матриц $X(t)$ (кроме первого случая) нормальными псевдорешениями [2] соответствующих матричных линейных алгебраических систем.

Случай 1. Пусть при $t = t_v$ имеют место условия, порождаемые (5), т.е.

$$A(t_v) \cdot A^{-1}(t_v) = A(0) \cdot X(0) = E_{m \times m}, \quad A^{-1}(t_v) \cdot A(t_v) = X(0) \cdot A(0) = E_{n \times n}, \quad (11)$$

где $A(0)$ - нулевая матричная дискрета матрицы $A(t)$ при $K=0$, а $X(0) \equiv A^{-1}(0)$ - нулевая матричная дискрета обратной матрицы $A^{-1}(t)$. Тогда из (10) имеем:

при $K=0$:

$$X(0) = X(0) \cdot A(0) \cdot X(0) = X(0) \cdot F(0)_I \cdot X(0) \equiv X(A(0); X(0)) = X(0)_I; \quad (12)$$

при $K=1$:

$$\cancel{X(1)} = X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) + \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot \cancel{X(1)}}_{E_{n \times n}} + X(1) \cdot \underbrace{A(0) \cdot X(0)}_{E_{m \times m}},$$

откуда с учетом (11):

$$X(1) = -X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) = X(0) \cdot F(1)_I \cdot X(0) \equiv X(A(1); X(0)) = X(1)_I; \quad (13)$$

при $K=2$:

$$\begin{aligned} \cancel{X(2)} &= X(0) \cdot A(2) \cdot X(0) + X(0) \cdot A(1) \cdot X(1) + \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot \cancel{X(2)}}_{E_{n \times n}} + \\ &+ \cancel{X(1) \cdot A(0) \cdot X(0)} + \cancel{X(1) \cdot A(1) \cdot X(0)} + X(2) \cdot \underbrace{A(0) \cdot X(0)}_{E_{m \times m}}, \end{aligned}$$

откуда с учетом (11) и (13):

$$\begin{aligned} X(2) &= X(0) \cdot [-A(2) + A(1) \cdot X(0) \cdot A(1)] \cdot X(0) = \\ &= X(0) F(2)_I X(0) \equiv X(A(1), A(2); X(0)) = X(2)_I; \end{aligned} \quad (14)$$

при $K=3$:

$$\begin{aligned} \cancel{X(3)} &= X(0) \cdot A(3) \cdot X(0) + X(0) \cdot A(2) \cdot X(1) + \cancel{X(0) \cdot A(1) \cdot X(2)} + \\ &+ X(1) \cdot A(2) \cdot X(0) + X(1) \cdot A(1) \cdot X(1) + \cancel{X(1) \cdot A(0) \cdot X(2)} + \\ &+ \cancel{X(2) \cdot A(1) \cdot X(0)} + \cancel{X(2) \cdot A(0) \cdot X(1)} + X(3) \cdot \underbrace{A(0) \cdot X(0)}_{E_{m \times m}} + \\ &+ \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot \cancel{X(3)}}_{E_{n \times n}}, \end{aligned}$$

откуда с учетом (11), (13) и (14):

$$\begin{aligned} X(3) &= X(0) \cdot [-A(3) + A(2) \cdot X(0) \cdot A(1) + A(1) \cdot X(0) \cdot A(2) - \\ &- A(1) \cdot X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) \cdot A(1)] \cdot X(0) = X(0) \cdot F(3)_I \cdot X(0) \equiv \\ &\equiv X(A(1), \dots, A(3); X(0)) = X(3)_I; \end{aligned} \quad (15)$$

.....

при $K=K$:

$$\begin{aligned} X(K) &= \sum_{\substack{p=K, q=K, r=K \\ p=0, q=0, r=0 \\ p+q+r=K}} X(p) \cdot A(q) \cdot X(r) = - \sum_{\substack{p=K-1, q=K, r=K-1 \\ p=0, q=0, r=0 \\ p+q+r=K}} X(p) \cdot A(q) \cdot X(r) = \\ &= X(0) \cdot F(K)_I \cdot X(0) \equiv X(A(1), \dots, A(K); X(0)) = X(K)_I. \end{aligned} \quad (16)$$

Пример 1. Пусть [16]

$$A(t) = \begin{bmatrix} (1-t) & (1+2t) & (2+3t) & 1 \\ t & (1-t) & t^2 & t \\ t^3 & (t+6) & (2+t^2) & (2-t) \\ (1-t) & (1+2t^2) & (2+t) & (1-t) \end{bmatrix},$$

а $t_v = 1$. Тогда имеем следующие матричные дискреты для матрицы $A(t)$:

$$\begin{aligned} A(0) &= \begin{bmatrix} 0 & 3 & 5 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 7 & 3 & 1 \\ 0 & 3 & 3 & 0 \end{bmatrix}, \quad A(1) = \begin{bmatrix} -1 & 2 & 3 & 0 \\ 1 & -1 & 2 & 1 \\ 3 & 1 & 2 & -1 \\ -1 & 4 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot H, \quad A(2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot H^2, \\ A(3) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot H^3, \quad A(K) = [0], \forall K \geq 4. \end{aligned}$$

В соответствии с рекуррентными процедурами (11)-(16) получим следующие матричные дискреты для параметрической обобщенной обратной матрицы $X(t)$:

$$\begin{aligned} X(0) &= \begin{bmatrix} -1 & 1.2 & -0.2 & 1.466666 \\ 0 & -0.2 & 0.2 & -0.133333 \\ 0 & 0.2 & -0.2 & 0.466666 \\ 1 & -0.4 & 0.4 & -1.933333 \end{bmatrix}, \\ X(1) &= \begin{bmatrix} 0.2 & 0.213333 & -0.346666 & -0.213333 \\ 0.8 & -0.746666 & 0.213333 & -1.253333 \\ -0.8 & 1.213333 & -0.346666 & 1.120000 \\ 0.6 & -2.826666 & 1.093333 & -1.506666 \end{bmatrix} \cdot H, \end{aligned}$$

$$X(2) = \begin{bmatrix} -2.186666 & 2.165333 & -0.752000 & 3.301333 \\ 0.653333 & -1.578666 & 0.632000 & -1.221333 \\ -1.186666 & 1.432000 & -0.685333 & 2.034666 \\ 4.973333 & -4.357333 & 1.797333 & -7.576000 \end{bmatrix} \cdot H^2,$$

$$X(3) = \begin{bmatrix} -2.061333 & 3.991470 & -1.546130 & 3.839640 \\ 2.714670 & -2.903470 & 1.178130 & -4.172090 \\ -2.794670 & 4.298130 & -1.586130 & 4.532980 \\ 5.896000 & -11.753600 & 4.436270 & -10.508600 \end{bmatrix} \cdot H^3$$

и т.д. Для восстановления матричного оригинала $X(t) \equiv A^{-1}(t)$ при использовании обратных дифференциально-падеевских (ДП) преобразований [9] и $K = 0,50$ результаты вычислений с точностью до 10^{-16} совпадают с результатами, полученными в [16] методом Фаддеева (из-за сложности аналитических выражений элементов матрицы $X(t)$ здесь они не приводятся; при необходимости читатель может обратиться к работе [16]).

Случай 2. Пусть при $t = t_v$ имеют место условия, порождаемые (6), т.е.

$$A(t_v) \cdot X(t_v) = A(0) \cdot X(0) = E_{m \times m}, \quad X(t_v) \cdot A(t_v) = X(0) \cdot A(0) \neq E_{n \times n} \quad (17)$$

(здесь и далее во всех соотношениях $+$ – знак псевдообращения). Тогда:

при $K=0$: условие (12) остается в силе, ибо, исходя из условий (12) и (17) и из того факта, что для любой матрицы A имеет место условие $[A^+ A]^+ = A^+ A$ (см. [3], стр. 50), получим

$$\begin{aligned} X(0) &= [X(0) \cdot A(0)]^+ \cdot X(0) = [X(0) \cdot A(0)]^+ \cdot X(0)_I = [X(0) \cdot A(0)] \cdot X(0)_I = \\ &= X(0) \cdot F(0) \cdot X(0) \equiv X(A(0); X(0)) = X(0)_{II} = A^+(0); \end{aligned} \quad (18)$$

при $K=1$: из условия (13) с учетом (17), аналогично (18):

$$\begin{aligned} X(1) &= -[X(0) \cdot A(0)]^+ \cdot X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) = [X(0) \cdot A(0)]^+ \cdot X(1)_I = \\ &= [X(0) \cdot A(0)] \cdot X(1)_I = X(0) \cdot F(1)_{II} \cdot X(0) \equiv X(A(1); X(0)) = \\ &= X(1)_{II} = X(1)_I; \end{aligned} \quad (19)$$

при $K=2$: из условия (14) с учетом (17)–(19), аналогично (18):

$$\begin{aligned} X(2) &= -[X(0) \cdot A(0)]^+ \cdot [X(0) \cdot A(2) \cdot X(0) + X(0) \cdot A(1) \cdot X(1) + \\ &+ X(1) \cdot A(0) \cdot X(1) + X(1) \cdot A(1) \cdot X(0)] = \\ &= [X(0) \cdot A(0)]^+ \cdot X(2)_I = [X(0) \cdot A(0)] \cdot X(2)_I = X(0) \cdot F(2)_{II} \cdot X(0) \equiv \\ &\equiv X(A(1), (2); X(0)) = X(2)_{II} = X(2)_I; \end{aligned} \quad (20)$$

при $K=3$: из условия (15) с учетом (17)–(20), аналогично (18):

$$\begin{aligned}
X(3) &= -[X(0) \cdot A(0)]^+ \cdot [X(0) \cdot A(3) \cdot X(0) + X(0) \cdot A(2) \cdot X(1) + \\
&\quad + X(0) \cdot A(1) \cdot X(2) + X(1) \cdot A(2) \cdot X(0) + X(1) \cdot A(1) \cdot X(1) + \\
&\quad + X(1) \cdot A(0) \cdot X(2) + X(2) \cdot A(1) \cdot X(0) + X(2) \cdot A(0) \cdot X(1)] = \\
&= [X(0) \cdot A(0)]^+ \cdot X(3)_I = [X(0) \cdot A(0)] \cdot X(3)_I = X(0) \cdot F(3)_{II} \cdot X(0) \equiv \\
&\equiv X(A(1), \dots, A(3); X(0)) = X(3)_{II} = X(3)_I;
\end{aligned} \tag{21}$$

при $K=K$: по аналогии с (19)-(21) нормальное псевдорешение :

$$\begin{aligned}
X(K) &= \sum_{\substack{p=K, q=K, r=K \\ p=0, q=0, r=0 \\ p+q+r=K}} X(p) \cdot A(q) \cdot X(r) = [X(0) \cdot A(0)]^+ \cdot \left[\sum_{\substack{p=K-1, q=K, r=K-1 \\ p=0, q=0, r=0 \\ p+q+r=K}} X(p) \cdot A(q) \cdot X(r) \right] = \\
&= [X(0) \cdot A(0)]^+ \cdot X(K)_I = [X(0) \cdot A(0)] \cdot X(K)_I = \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(0)}_{X(0)} \cdot F(K)_I \cdot X(0) = \\
&= X(0) \cdot F(K)_I \cdot X(0) \equiv X(A(1), \dots, A(K); X(0)) = X(K)_{II} = X(K)_I.
\end{aligned} \tag{22}$$

Пример 2. Пусть

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

а $t_v = 0$. Тогда имеем следующие матричные дискреты для матрицы $A(t)$:

$$\begin{aligned}
A(0) &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A(1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot H, \quad A(2) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot H^2, \\
A(K) &= [0], \quad \forall K \geq 3.
\end{aligned}$$

В соответствии с рекуррентными процедурами (17)-(22) получим следующие матричные дискреты для параметрической обобщенной обратной матрицы $X(t)$:

$$X(0) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad X(K) = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot H^K, \quad K \geq 1.$$

Следовательно, обратные ДП-преобразования приводят к следующему матричному оригиналу:

$$X(t) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{1-t} & \frac{t}{1-t} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{1-t} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{t}{1-t} \end{bmatrix} \equiv A^+(t).$$

Случай 3. Пусть при $t = t_v$ имеют место условия, порождаемые (7), т.е.

$$A(t_v) \cdot X(t_v) = A(0) \cdot X(0) \neq E_{m \times m}, \quad X(t_v) \cdot A(t_v) = X(0) \cdot A(0) = E_{n \times n}. \quad (23)$$

Тогда:

при $K=0$: условие (12) остается в силе, ибо, исходя из условий (12) и (23) и из того факта, что для любой матрицы A , естественно, имеет место и условие $[AA^+]^+ = AA^+$, получим

$$\begin{aligned} X(0) &= X(0) \cdot [A(0) \cdot X(0)]^+ = X(0)_I \cdot [A(0) \cdot X(0)]^+ = X(0)_I \cdot [A(0) \cdot X(0)] = \\ &= X(0) \cdot F(0)_{III} \cdot X(0) \equiv X(A(0); X(0)) = X(0)_{III} = X(0)_{II} = A^+(0); \end{aligned} \quad (24)$$

при $K=1$: из условия (13) с учетом (23), аналогично (24):

$$\begin{aligned} X(1) &= -X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) \cdot [A(0) \cdot X(0)]^+ = X(1)_I \cdot [A(0) \cdot X(0)]^+ = \\ &= X(1)_I \cdot [A(0) \cdot X(0)] = X(0) \cdot F(1)_{III} \cdot X(0) \equiv X(A(1); X(0)) = \\ &= X(1)_{III} = X(1)_{II} = X(1)_I; \end{aligned} \quad (25)$$

при $K=2$: из условия (14) с учетом (24), (25), аналогично (24):

$$\begin{aligned} X(2) &= -[X(0) \cdot A(2) \cdot X(0) + X(0) \cdot A(1) \cdot X(1) + \\ &+ X(1) \cdot A(0) \cdot X(1) + X(1) \cdot A(1) \cdot X(0)] \cdot [A(0) \cdot X(0)]^+ = \\ &= X(2)_I \cdot [A(0) \cdot X(0)]^+ = X(2)_I \cdot [A(0) \cdot X(0)] = \\ &= X(0) \cdot F(2)_{III} \cdot X(0) \equiv X(A(1), A(2); X(0)) = X(2)_{III} = X(2)_{II} = X(2)_I; \end{aligned} \quad (26)$$

при $K=3$: из условия (15) с учетом (24)-(26), аналогично (24):

$$\begin{aligned} X(3) &= -[X(0) \cdot A(3) \cdot X(0) + X(0) \cdot A(2) \cdot X(1) + X(0) \cdot A(1) \cdot X(2) + \\ &+ X(1) \cdot A(2) \cdot X(0) + X(1) \cdot A(1) \cdot X(1) + X(1) \cdot A(0) \cdot X(2) + \\ &+ X(2) \cdot A(1) \cdot X(0) + X(2) \cdot A(0) \cdot X(1)] \cdot [A(0) \cdot X(0)]^+ = \\ &= X(3)_I \cdot [A(0) \cdot X(0)]^+ = X(3)_I \cdot [A(0) \cdot X(0)] = X(0) \cdot F(3)_{III} \cdot X(0) \equiv \\ &\equiv X(A(1), \dots, A(3); X(0)) = X(3)_{III} = X(3)_{II} = X(3)_I; \end{aligned} \quad (27)$$

.....
при $K=K$: по аналогии с (24)-(27) нормальное псевдорешение:

$$\begin{aligned}
X(K) &= \sum_{\substack{p=K, q=K, r=K \\ p=0, q=0, r=0 \\ p+q+r=K}} X(p) \cdot A(q) \cdot X(r) = \left[\sum_{\substack{p=K-1, q=K, r=K-1 \\ p=0, q=0, r=0 \\ p+q+r=K}} X(p) \cdot A(q) \cdot X(r) \right] \cdot [A(0) \cdot X(0)]^+ = \\
&= X(K)_I \cdot [A(0) \cdot X(0)]^+ = X(K)_I \cdot [A(0) \cdot X(0)] = X(0) \cdot F(K)_I \cdot \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(0)}_{X(0)} \equiv (28) \\
&= X(0) \cdot F(K)_{III} \cdot X(0) \equiv X(A(1), \dots, A(K); X(0)) = X(K)_{III} = X(K)_{II} = X(K)_I.
\end{aligned}$$

Пример 3. Пусть [14]

$$A(t) = \begin{bmatrix} \frac{(1+t^2)}{(1+t^2+t^4)} & -\frac{t}{(1+t^2+t^4)} \\ \frac{t^3}{(1+t^2+t^4)} & \frac{1}{(1+t^2+t^4)} \\ \frac{(-t^2)}{(1+t^2+t^4)} & \frac{(t+t^3)}{(1+t^2+t^4)} \end{bmatrix},$$

а $t_v = 0$. Тогда имеем следующие матричные дискреты для матрицы $A(t)$:

$$A(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, A(1) = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot H, A(2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot H^2, \dots \text{ и т.д.}$$

В соответствии с рекуррентными процедурами (23)-(28) получим следующие матричные дискреты для параметрической обобщенной обратной матрицы $X(t)$:

$$X(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, X(1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, X(K) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot H^K, K \geq 2.$$

Следовательно, обратные дифференциально-маклореновские (ДМ) преобразования [9] приводят к следующему матричному оригиналу:

$$X(t) = \begin{bmatrix} 1 & t & 0 \\ 0 & 1 & t \end{bmatrix} \equiv A^+(t).$$

Случай 4. Пусть при $t = t_v$ имеют место условия, порождаемые (8), т.е.

$$A(t_v) \cdot X(t_v) = A(0) \cdot X(0) \neq E_{m \times m}, X(t_v) \cdot A(t_v) = X(0) \cdot A(0) \neq E_{n \times n}. \quad (29)$$

Тогда:

при $K=0$: условие (12) остается в силе, т.е.

$$\begin{aligned}
X(0) &= [X(0) \cdot A(0)]^+ \cdot X(0) = X(0) \cdot [A(0) \cdot X(0)]^+ = X(0) \cdot A(0) \cdot X(0) = \\
&= X(0) \cdot F(0)_{IV} \cdot X(0) \equiv X(A(0); X(0)) = X(0)_{IV} = X(0)_{III} = X(0)_{II} = A^+(0); \quad (30)
\end{aligned}$$

при K=1: в соответствии с (10) и (29)

$$X(1) = X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) + X(0) \cdot A(0) \cdot X(1) + X(1) \cdot A(0) \cdot X(0),$$

откуда

$$X(1) \cdot \underbrace{A(0) \cdot X(0)}_{\neq E_{m \times m}} = X(1) - X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) - \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(1)}_{\neq E_{n \times n}}$$

или

$$\begin{aligned} X(1) &= [X(1) - X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) - X(0) \cdot A(0) \cdot X(1)] \cdot [A(0) \cdot X(0)]^+ = \\ &= [X(1) - X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) - X(0) \cdot A(0) \cdot X(1)] \cdot A(0) \cdot X(0) = \\ &= X(1) \cdot A(0) \cdot X(0) - X(0) \cdot A(1) \cdot \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(0)}_{X(0)} - X(0) \cdot A(0) \cdot X(1) \cdot A(0) \cdot X(0) = \\ &= X(1) \cdot A(0) \cdot X(0) - X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) - X(0) \cdot A(0) \cdot X(1) \cdot A(0) \cdot X(0), \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} X(1) \cdot [A(0) \cdot X(0)]^+ &= X(1) \cdot \cancel{A(0)} \cdot X(0) = \\ &= X(1) \cdot A(0) \cdot \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(0)}_{X(0)} - X(0) \cdot A(1) \cdot \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(0)}_{X(0)} - X(0) \cdot A(0) \cdot X(1) = \\ &= X(1) \cdot \cancel{A(0)} \cdot X(0) - X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) - X(0) \cdot A(0) \cdot X(1) \end{aligned}$$

или

$$X(0) \cdot A(0) \cdot X(1) = -X(0) \cdot A(1) \cdot X(0),$$

откуда

$$\begin{aligned} X(1) &= -[X(0) \cdot A(0)]^+ \cdot X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) = \\ &= \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(0)}_{X(0)} \cdot A(1) \cdot X(0) = -X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) \equiv \\ &\equiv X(A(1); X(0)) = X(1)_{IV} = X(1)_{III} = X(1)_{II} = X(1)_I; \end{aligned} \quad (31)$$

при K=2: в соответствии с (10), (29) и (31)

$$\begin{aligned} X(2) &= X(0) \cdot A(2) \cdot X(0) + X(0) \cdot A(1) \cdot X(1) + X(0) \cdot A(0) \cdot X(2) + \\ &+ X(1) \cdot A(0) \cdot X(1) + X(1) \cdot A(1) \cdot X(0) + X(2) \cdot A(0) \cdot X(0), \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} X(2) \cdot A(0) \cdot X(0) &= X(2) - X(0) \cdot A(2) \cdot X(0) - X(0) \cdot A(1) \cdot X(1) - \\ &- X(0) \cdot A(0) \cdot X(2) - \cancel{X(1) \cdot A(0) \cdot X(1)} - \cancel{X(1) \cdot A(1) \cdot X(0)}, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned}
X(2) &= [X(2) - X(0) \cdot A(2) \cdot X(0) + X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) - \\
&\quad - X(0) \cdot A(0) \cdot X(2)] \cdot [A(0) \cdot X(0)]^+ = X(2) \cdot A(0) \cdot X(0) - \\
&\quad - X(0) \cdot A(2) \cdot \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(0)}_{X(0)} + \\
&\quad + X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) \cdot A(1) \cdot \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(0)}_{X(0)} - X(0) \cdot A(0) \cdot X(2) \cdot A(0) \cdot X(0) = \\
&= X(2) \cdot A(0) \cdot X(0) - X(0) \cdot A(2) \cdot X(0) + X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) - \\
&\quad - X(0) \cdot A(0) \cdot X(2) \cdot A(0) \cdot X(0),
\end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned}
X(2) \cdot [A(0) \cdot X(0)]^+ &= \cancel{X(2) \cdot A(0) \cdot X(0)} = \cancel{X(2) \cdot A(0) \cdot \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(0)}_{X(0)}} - \\
&\quad - X(0) \cdot A(2) \cdot \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(0)}_{X(0)} + X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) \cdot A(1) \cdot \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(0)}_{X(0)} - \\
&\quad - X(0) \cdot A(0) \cdot X(2) \cdot A(0) \cdot \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(0)}_{X(0)}
\end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned}
X(0) \cdot A(0) \cdot X(2) \cdot A(0) \cdot X(0) &= -X(0) \cdot A(2) \cdot X(0) + \\
&\quad + X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) \cdot A(1) \cdot X(0),
\end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned}
X(2) &= [X(0) \cdot A(0)]^+ \cdot (-X(0) \cdot A(2) \cdot X(0) + X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) \cdot A(1) \cdot X(0)) [A(0) \cdot X(0)]^+ = \\
&= -\underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(0)}_{X(0)} \cdot A(2) \cdot \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(0)}_{X(0)} + \\
&\quad + \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(0)}_{X(0)} \cdot A(1) \cdot X(0) \cdot A(1) \cdot \underbrace{X(0) \cdot A(0) \cdot X(0)}_{X(0)} = \quad \text{и} \\
&= -X(0) \cdot A(2) \cdot X(0) + X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) \cdot A(1) \cdot X(0) \equiv X(A(1), A(2); X(0)) = \\
&= X(2)_{IV} = X(2)_{III} = X(2)_{II} = X(2)_I \quad (32)
\end{aligned}$$

т.д.

Пример 4 [8]. Для этой тестовой матрицы с размерами 11×11 имеют место условия (29). Как показали расчеты, полученное на основе соотношений (30)-(32) решение $A^+(t)$ точно совпадает с решением, полученным в [8] другим методом (из-за громоздкости матричных дискрет и решения $X(t)$ они здесь не приводятся). Очевидно, что во всех четырех случаях, вне зависимости от выполнения условий (5)-(8), для вычисления матричных дискрет $X(K)$, $K = \overline{0, \infty}$ необходимо оперировать полностью совпадающими друг с другом соотношениями (16), (22) или (28). Восстановление матричного оригинала - численно-аналитического решения $X(t)$ в соответствии с

некоторым обратным дифференциальным преобразованием, естественно, не представит трудности.

Примечание. Легко можно убедиться, что для рассмотренных примеров выполняются как парные условия (5),(11); (6),(17); (7),(23); (8), (29) соответственно, так и все условия (1)-(4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. -М.: Наука, 1967.-575с.
2. Грегори Р., Кришнамурти Е. Безошибочные вычисления. Методы и приложения. – М.: Мир, 1988. – 208с.
3. Ben-Israel A., Greville T.N. E. Generalized Inverses Theory and Applications. –A Wiley-Interscience Publication, 2002. –371p.
4. Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. -М.: Высшая школа, 1998.-571с.
5. Батков А.М. Современные методы проектирования систем автоматического управления. -М., 1967.-704с.
6. Karampetakis N.P., Tzekis P. On the Computation of the Generalized Inverse of a Polynomial Matrix //IMA J. Math. Control Inform. – 2001. –Vol. 18, No. 1. –P. 83-97.
7. Karampetakis N.P., Vologiannidis S. DFT Calculation of the Generalized and Drazin Inverse of a Polynomial Matrix //Applied Mathematics and Computation. –2003. –Vol. 143. –P. 501-521.
8. Stanimirovic P.S., Tasic M. B., Krtolica P.V., Karampetakis N.P. Generalized Inversion by Interpolation //Filomat. –2007. –Vol. 21, No. 1. –P. 67-86.
9. Пухов Г.Е. Дифференциальные спектры и модели. -Киев: Наукова думка, 1990.- 230 с.
10. Бадалян Л.А. Матричный аппроксимационный синтез неавтономных псевдообратных матриц // Сб. мат. Межд. молодежной конф. “Информационные технологии”.-Ереван, 2005.- С. 127-132.
11. Симонян С.О., Бадалян Л.А. Аналогии для определения неавтономных псевдообратных матриц на основе метода ортогонализации Грамма-Шмидта и дифференциальных преобразований Пухова //Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2006. –Т LIX, N2. -С.406-417.
12. Симонян С.О., Бадалян Л.А. Дифференциально-тейлоровский аналог метода блочного разбиения для определения неавтономных псевдообратных матриц // Вестник Инженерной академии Армении.-2005.-Т.2, N1.-С.109-116.
13. Симонян С.О., Бадалян Л.А. Дифференциально-тейлоровский аналог метода Гревилля для неавтономных матриц //Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2005.- Т. LVIII, N2. – С.340-353.
14. Симонян С.О., Бадалян Л.А. Метод сингулярного разложения неавтономных матриц на основе дифференциальных преобразований //Вестник ГИУА. Сер. Моделирование, оптимизация, управление. -2005.-Вып.8, том 2.- С.120-133.
15. Симонян С.О., Бадалян Л.А. Определение неавтономных псевдообратных матриц на основе метода исключения Жордана-Гаусса и дифференциальных преобразований Пухова // Вестник ГИУА. Сер. Моделирование, оптимизация, управление. -2005.-Вып.9, том 2.- С.128-137.
16. Բադալյան Լ.Ա. Ոչ ավտոնոմ համակարգերի մի քանի ինվարիանտների որոշման մեթոդների մշակումն ու հաշվողական գործընթացների ավտոմատացումը //Ե.13.02 - ՊԱվտոմատացման համակարգերի մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության սեղմագիր. - Երևան, 2006. -21 էջ:

ГИУА. Материал поступил в редакцию 11.012008.

Ս.Հ. ՄԻՄՈՆՅԱՆ, Ա.Գ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Ա.Ս. ՄԻՄՈՆՅԱՆ

ՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ԸՆԴՀԱՆՐԱՅՎԱԾ ՀԱԿԱԴԱՐՁ ՄԱՏՐԻՑՆԵՐԻ
ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴ [I]

Առաջարկված է պարամետրական ընդհանրացված-հակադարձ մատրիցների որոշման հասարակ մեթոդ՝ հիմնված Գ.Ե. Պուխովի դիֆերենցիալ ձևափոխությունների վրա:

Առանցքային բառեր. պարամետրական ընդհանրացված հակադարձ մատրիցներ, դիֆերենցիալ ձևափոխություններ, թվա-անալիտիկ լուծումներ:

S.H. SIMONYAN, A.G. AVETISSYAN, A.S. SIMONYAN

METHOD OF DETERMINATION OF PARAMETRIC GENERALIZED INVERSE MATRICES
[I]

A simple method of the parametric generalized inverse matrices determination based on G.E. Pukhov's differential transformations is proposed.

Keywords: parametric generalized inverse matrices, differential transformations, numerical-analytical solutions.

Ս.Ա. ՍԱՀԱԿՅԱՆ, Մ.Կ. ԴԱՐԱՆՅԱՆ, Ա.Ս. ՍԱՀԱԿՅԱՆ

**ՕՊՏԻՄԱԼ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՎԱՐԻԱՑԻՈՆ ՀԱՇՎԻ ԽՆԴԻՐՆԵՐՈՒՄ
ՖՈՒՆԿՑԻՈՆԱԼ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ԱՐԳՈՒՄԵՆՏԻ ԵԶՐԱՅԻՆ
ԱՐԺԵՔԻ ՇԵՂՈՒՄՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ**

Մշակված է օպտիմալ կառավարման համակարգերում արգումենտի եզրային արժեքի շեղումների դեպքում ֆունկցիոնալի արժեքի փոփոխությունների աստիճանային շարքով գնահատման մեթոդ:

Առանցքային բառեր. օպտիմալ կառավարում, դինամիկա, եզրային պայմաններ, դիֆերենցիալ հավասարում, արդյունավետության ցուցանիշ, գնահատում, արգումենտ, ֆունկցիոնալ:

Ներածություն: Կառավարման նպատակի պարամետրերի շեղումներից կախված՝ կառավարման դինամիկ համակարգերում (ԿԴՀ) արդյունավետության ցուցանիշի (ՄՅ) փոփոխության գնահատման մաթեմատիկական ապարատն ունի գործնական նշանակություն համակարգերի հետազոտման, նախագծման և այլ աշխատանքներում: Գիտական աշխատանքում [1] մշակվել է ՄՅ-երի փոփոխության առաջին մոտավորությամբ գնահատման մեթոդ: Ուսումնասիրվում է ավտոնոմ համակարգերում մեկ անհայտ ֆունկցիայով ոչ պայմանական դինամիկ օպտիմալացման խնդիրների ՄՅ-ի փոփոխության գնահատումը՝ կախված արգումենտի աջակողմյան եզրի փոփոխությունից, աստիճանային շարքով՝ երկրորդ անդամի ճշտությամբ:

Մաթեմատիկական ապարատը: Ունենք ոչ պայմանական դինամիկ օպտիմալացման հետևյալ խնդիրը.

$$I = \int_{t_0}^t F(y(\tau), \dot{y}(\tau)) d\tau \rightarrow \min_y (\max), \quad (1)$$

$$\begin{cases} \tau = t_0, & y = y^0, \\ \tau = t, & y = y^t: \end{cases} \quad (2)$$

Օպտիմալ y ֆունկցիան կախված կլինի ինչպես ընթացիկ τ արգումենտից, այնպես էլ եզրային (2) պարամետրերից: Ենթադրվում է, որ t_0, y^0 և y^t եզրային պարամետրերը անփոփոխ են: Այդ դեպքում y ֆունկցիան կարելի է դիտարկել որպես երկու արգումենտի ֆունկցիա՝ $y = y(\tau, t)$:

Ֆունկցիոնալի օպտիմալ արժեքը կախված կլինի t արգումենտից և կարելի է ներկայացնել որպես $I(t)$ ֆունկցիա՝

$$I(t) = \int_{t_0}^t F(y(\tau, t), \dot{y}(\tau, t)) d\tau : \quad (3)$$

Ենթադրենք, ինչպես $y(\tau, t)$ -ն, այնպես էլ $F(y, \dot{y})$ ֆունկցիաները ունեն երկրորդ կարգի անընդհատ մասնակի ածանցյալներ: Ֆունկցիոնալի $I(t)$ արժեքի ΔI փոփոխությունը, կախված t պարամետրի Δt փոփոխությունից, կարելի է ներկայացնել հետևյալ աստիճանային շարքի տեսքով՝ երկրորդ անդամի ճշտությամբ.

$$\Delta I = I(t + \Delta t) - I(t) = I_t(t) \cdot \Delta t + I_{tt}(t) \cdot \Delta t^2 / 2 + \alpha(\Delta t^2), \quad (4)$$

որտեղ $I_t(t) = \frac{\partial I(t)}{\partial t}$, $I_{tt}(t) = \frac{\partial^2 I(t)}{\partial t^2}$:

Ինչպես բխում է (4)-ից, ΔI փոփոխության գնահատման համար անհրաժեշտ է ունենալ $I_t(t)$ և $I_{tt}(t)$ գործակիցների արժեքները: Եզրային t պարամետրի Δt շեղման դեպքում $I(t + \Delta t)$ -ն (3)-ից կորոշվի հետևյալ արտահայտությամբ.

$$I(t + \Delta t) = \int_{t_0}^{t+\Delta t} F(y(\tau, t + \Delta t), \dot{y}(\tau, t + \Delta t)) d\tau : \quad (5)$$

Հետագա ձևափոխությունների ընթացքում նպատակահարմար է օգտվել հետևյալ նշանակումներից.

$$\begin{aligned} y(\tau, t) &= y; & \frac{dy}{d\tau} &= \dot{y}(\tau, t) = \frac{\partial y}{\partial \tau} = \dot{y}; & y(\tau, t)_{\tau=t} &= y(t); \\ \dot{y}(\tau, t)_{\tau=t} &= \dot{y}(t); & \frac{\partial F(y, \dot{y})}{\partial y} &= F_y; & \frac{\partial F(y, \dot{y})}{\partial \dot{y}} &= F_{\dot{y}} : \end{aligned} \quad (6)$$

(5)-ում բերված ենթաինտեգրալային արտահայտությունը երկրորդ անդամի մոտավորությամբ t արժեքի շրջակայքում վերածելով շարքի՝ կունենանք.

$$\begin{aligned} I(t + \Delta t) &= \int_{t_0}^{t+\Delta t} (F(y(\tau, t); \dot{y}(\tau, t)) + (F_y \frac{\partial y}{\partial t} + F_{\dot{y}} \frac{\partial \dot{y}}{\partial t})_{\Delta t=0} \cdot \Delta t + \\ &+ \frac{1}{2} \int_{t_0}^t F_{yy} (\frac{\partial y}{\partial t})^2 + 2F_{y\dot{y}} \frac{\partial y}{\partial t} \cdot \frac{\partial \dot{y}}{\partial t} + F_{\dot{y}\dot{y}} (\frac{\partial \dot{y}}{\partial t})^2 + F_y \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + F_{\dot{y}} \frac{\partial^2 \dot{y}}{\partial t^2})_{\Delta t=0} \cdot \Delta t^2 d\tau = (7) \\ &= \int_{t_0}^{t+\Delta t} M(\tau, t) d\tau + \alpha_1(\Delta t^2), \end{aligned}$$

որտեղ $\alpha_1(\Delta t^2)$ -ն աստիճանային շարքում Δt -ի երրորդ և ավելի բարձր կարգի անդամներն են: Օգտվելով ինտեգրալի սահմանների հատկությունից՝ ստացված արտահայտությունը կարելի է ներկայացնել ինտեգրալների գումարով՝

$$I(t + \Delta t) = \int_{t_0}^{t+\Delta t} M(\tau, t) d\tau + \int_{t_0}^t M(\tau, t) d\tau + \alpha_1(\Delta t^2) : \quad (8)$$

Օգտվելով Ադամսի ձևափոխված մեթոդից (սեղանների բանաձև) [2,3]՝ (8) –ում գումարի առաջին անդամն արտահայտենք Δt -ով՝ երկրորդ անդամի ճշտությամբ՝

$$\int_t^{t+\Delta t} M(\tau, t) d\tau = M(\tau, t)_{\tau=t} + \frac{1}{2} \frac{\partial M(\tau, t)}{\partial \tau} \Big|_{\tau=t} \cdot \Delta t^2 + \alpha_2 (\Delta t^2): \quad (9)$$

Կիրառելով $y(\tau, t)$ ֆունկցիայի մասնակի ածանցյալների միջև $\tau = t_0$ և $\tau = t$ եզրային կետերում [1] առնչությունները՝

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial t} \Big|_{\tau=t_0} &= 0; & \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \Big|_{\tau=t_0} &= 0; \\ \frac{\partial y}{\partial t} \Big|_{\tau=t} &= -\dot{y}(t); & (\ddot{y} + 2 \frac{\partial \dot{y}}{\partial t} + \frac{\partial^2 y}{\partial t^2})_{\tau=t} &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

հաշվի առնելով նաև (7)-ը և (8)-ը՝ (9) արտահայտությունը կընդունի հետևյալ տեսքը.

$$\int_t^{t+\Delta t} M(\tau, t) d\tau = F_{\tau=t} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} (F_{\dot{y}} (2 \frac{\partial \dot{y}}{\partial t} + \ddot{y}) - \dot{y} F_{\dot{y}})_{\tau=t} \cdot \Delta t^2 + \alpha_2 (\Delta t^2): \quad (11)$$

Ձևափոխելով (8) արտահայտության երկրորդ գումարելին, կատարելով մասերով ինտեգրում, հաշվի առնելով (7)-ը, (10)-ը, (11) –ը և այն, որ $y(\tau, t)$ ֆունկցիան բավարարում է Էյլերի հավասարմանը՝ կունենանք ԱՅ –ի ΔI փոփոխության գնահատման հետևյալ արտահայտությունը.

$$\begin{aligned} \Delta I &= (F - \dot{y} F_{\dot{y}})_{\tau=t} \cdot \Delta t + (\dot{y}^2 F_{\dot{y}\dot{y}} - \dot{y} F_{\dot{y}})_{\tau=t} \cdot \Delta t^2 / 2 + \\ &+ \frac{1}{2} \left(\int_{t_0}^t ((F_{\dot{y}\dot{y}} - \frac{d}{d\tau} F_{\dot{y}\ddot{y}}) (\frac{\partial y}{\partial t})^2 + F_{\dot{y}\ddot{y}} (\frac{\partial \dot{y}}{\partial t})^2) d\tau \right) \cdot \Delta t^2 + \alpha (\Delta t^2), \end{aligned} \quad (12)$$

որտեղ $\alpha(\Delta t^2)$ –ն աստիճանային շարքում բարձր կարգի անդամներն են:

Ստացված (12) օրինաչափության մեջ, նկատի ունենալով (4) –ը, $I_t(t)$ և $I_{tt}(t)$ գործակիցները կորոշվեն հետևյալ արտահայտություններով.

$$\begin{aligned} I_t &= (F - \dot{y} F_{\dot{y}})_{\tau=t}, \\ I_{tt} &= (\dot{y}^2 F_{\dot{y}\dot{y}} - \dot{y} F_{\dot{y}})_{\tau=t} + \int_{t_0}^t ((F_{\dot{y}\dot{y}} - \frac{d}{d\tau} F_{\dot{y}\ddot{y}}) (\frac{\partial y}{\partial t})^2 + F_{\dot{y}\ddot{y}} (\frac{\partial \dot{y}}{\partial t})^2) d\tau: \end{aligned} \quad (13)$$

Քանի որ $y(\tau, t)$ ֆունկցիան (1,2) խնդրի լուծումն է, ապա (13)-ում այդ ֆունկցիայի ածանցյալների $\dot{y}(t)$ և $\ddot{y}(t)$ արժեքները հայտնի են, սակայն $\frac{\partial y(\tau, t)}{\partial t}$ և

$\frac{\partial \dot{y}(\tau, t)}{\partial t}$ ֆունկցիաները, որոնք անհրաժեշտ են (13) գործակիցների որոշման համար, խնդրի՝ թվային մեթոդներով լուծման դեպքում հայտնի չեն: Այդ ֆունկցիաները կարելի է որոշել այն դատողությունից, որ, բացի $y(\tau, t)$ ֆունկցիայից, Էյլերի հավասարումը տեղի ունի նաև $y(\tau, t + \Delta t)$ ֆունկցիայի համար՝ կամայական Δt աճի դեպքում: Էյլերի հավասարումը վերածելով աստիճանային շարքի ըստ $t + \Delta t$ արգումենտի t

արժեքի շրջակայքում և հաշվի առնելով այդ հավասարման տեղի ունենալու հանգամանքը անկախ Δt -ից՝ կունենանք առաջին աստիճանի վարիացիայի հետևյալ երկրորդ կարգի դիֆերենցիալ հավասարումը՝ $\frac{\partial y}{\partial t}$ -ի նկատմամբ.

$$(F_{yy} - \frac{d}{d\tau} F_{y\dot{y}}) \frac{\partial y}{\partial t} - \frac{d}{d\tau} F_{\dot{y}\dot{y}} \cdot \frac{\partial \dot{y}}{\partial t} - F_{\dot{y}\dot{y}} \cdot \frac{\partial \ddot{y}}{\partial t} = 0 :$$

Ստացված հավասարումը կարևոր է նաև այլ խնդիրների լուծման դեպքում, ուստի ընդհանրությունն ապահովելու համար այն նպատակահարմար է ներկայացնել հետևյալ տեսքով.

$$(F_{yy} - \frac{d}{d\tau} F_{y\dot{y}}) y_{1t} - \frac{d}{d\tau} F_{\dot{y}\dot{y}} \cdot \dot{y}_{1t} - F_{\dot{y}\dot{y}} \cdot \ddot{y}_{1t} = 0, \quad (14)$$

որտեղ

$$y_{1t} = y_{1t}(\tau, t) = \frac{\partial y(\tau, t)}{\partial t}, \quad \dot{y}_{1t} = \dot{y}_{1t}(\tau, t) = \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right), \quad \ddot{y}_{1t} = \ddot{y}_{1t}(\tau, t) = \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right):$$

Երկրորդ կարգի դիֆերենցիալ (14) հավասարումից կարելի է գտնել $y_{1t}(\tau, t)$ ֆունկցիան՝ (10)-ից բխող հետևյալ նախնական պայմանների դեպքում.

$$\begin{aligned} \tau = t_0, \quad y_{1t} &= 0; \\ \tau = t, \quad y_{1t} &= -\dot{y}(t): \end{aligned} \quad (15)$$

Այսպիսով, արդյունավետության ցուցանիշի արժեքի փոփոխությունը (4) արտահայտությամբ գնահատելու համար անհրաժեշտ է.

- Տրված t -ի դեպքում հայտնի y ֆունկցիայի միջոցով լուծել վարիացիայի (14) հավասարումը՝ (15) նախնական պայմանների դեպքում:
- Ունենալով $y_t(\tau, t)$, $\dot{y}_t(\tau, t)$ և $y(\tau, t)$ ֆունկցիաները՝ (13) -ից որոշել (4) արտահայտության $I_t(t)$ և $I_{tt}(t)$ գործակիցների թվային արժեքները:
- Տրված Δt շեղման դեպքում (4) կամ (12) արտահայտություններով որոշել ΔI փոփոխությունը կամ հակառակը. տրված ΔI -ի դեպքում որոշել Δt հնարավոր շեղումը արգումենտի եզրային t արժեքից:

Ներկայացված մեթոդը նախատեսված չէ այն խնդիրների համար, որոնցում էյլերի հավասարումը լուծվում է անալիտիկորեն, որովհետև այդ դեպքերում գնահատումը կարելի է կատարել ուղղակիորեն: Այն դեպքերում, երբ էյլերի հավասարումը հնարավոր է լուծել միայն թվային մեթոդներով, նախընտրելի է հոդվածում մշակված մեթոդը, որովհետև ցանկացած այլ մեթոդ, որը հնարավորություն կտա ստանալ (4)-ին համարժեք արտահայտություն, մի քանի անգամ աշխատատար է առաջարկված մեթոդից:

Մշակված (12) և (13) արտահայտությունների հավաստիությունը կարելի է հիմնավորել օրինակով:

Օրինակ Արդյունավետության ցուցանիշի արժեքի փոփոխությունը, կախված արգումենտի t եզրային արժեքի Δt փոփոխությունից, գնահատենք ինչպես ուղղակի մեթոդով՝ հաշվելով (3) ինտեգրալը և այն վերածելով աստիճանային շարքի ըստ t պարամետրի Δt շեղման, այնպես էլ հոդվածում մշակված մեթոդով, և արդյունքները համեմատենք հետևյալ խնդրի դեպքում.

$$I = \int_0^t (4y + \dot{y}^2) d\tau \rightarrow \min_y, \quad (16)$$

$$\begin{cases} \tau = 0, & y = 0, \\ \tau = t, & y = y^t: \end{cases} \quad (17)$$

$y(\tau, t)$ օպտիմալ ֆունկցիան կորոշենք էյլերի հավասարումից [4],

$$F_y - \frac{d}{d\tau} F_{\dot{y}} = 0 \quad \rightarrow \quad \ddot{y}(\tau, t) = 2:$$

Հաշվի առնելով (17) եզրային պայմանները՝ արդյունքում կունենանք՝

$$y(\tau, t) = \tau^2 + (y^t - t^2) \cdot \tau / t, \quad (18)$$

$$\dot{y}(\tau, t) = 2 \cdot \tau + (y^t - t^2) / t:$$

Այդ դեպքում ֆունկցիոնալի $I(t)$ արտահայտությունը (16)-ից կընդունի հետևյալ տեսքը.

$$I(t) = -t^3/3 + 2 \cdot y^t \cdot t + (y^t)^2/t: \quad (19)$$

Ստացված (19) հավասարումից, արգումենտի եզրային t արժեքի Δt շեղման դեպքում, $I(t + \Delta t)$ -ն վերածելով շարքի t կետի շրջակայքում՝ կունենանք՝

$$\Delta I(t) = (2 \cdot y^t - t^2 - (y^t)^2/t^2) \cdot \Delta t + ((y^t)^2/t^3 - t) \cdot \Delta t^2 + \alpha(\Delta t^2):$$

Արդյունքում, հաշվի առնելով (4) -ը, $I_t(t)$ և $I_{tt}(t)$ գործակիցները, կորոշվեն հետևյալ արտահայտություններով.

$$\begin{cases} I_t(t) = 2y^t - t^2 - (y^t)^2/t^2, \\ I_{tt}(t) = 2 \cdot (y^t)^2/t^3 - 2t: \end{cases} \quad (20)$$

Այժմ $I_t(t)$ և $I_{tt}(t)$ գործակիցները որոշենք հոդվածում մշակված մեթոդով, ըստ (13)-ի՝ օգտվելով $y(\tau, t)$ ֆունկցիայի (18) արտահայտությունից: Առաջին աստիճանի վարիացիայի (14) հավասարումը (16,17) խնդրի դեպքում կընդունի հետևյալ տեսքը.

$$\ddot{y}_{1t} = 0: \quad (21)$$

Ուսումնասիրվող խնդրի դեպքում (21) դիֆերենցիալ հավասարման նախնական պայմանները համաձայն (18) -ի, կլինեն՝

$$\tau = 0, \quad y_{1t} = 0;$$

$$\tau = t, \quad y_{1t} = -\dot{y}(t) = -(t + y^t/t):$$

Դիֆերենցիալ (21) հավասարման լուծումից կունենանք՝

$$y_{1t}(\tau, t) = -(1 + y^t/t^2) \cdot \tau: \quad (22)$$

Ստացված (22) ֆունկցիայի հիման վրա (13) արտահայտության $I_{tt}(t)$ գործակցի ինտեգրալային բաղադրիչը կընդունի հետևյալ տեսքը.

$$\int_0^t 2 \cdot (1 + \frac{y^t}{t^2})^2 d\tau = 2 \cdot (1 + \frac{y^t}{t^2})^2 \cdot t, \quad (23)$$

քանի որ (16) ֆունկցիոնալի դեպքում տեղի ունի $F_{yy} = 0, F_{y\dot{y}} = 0, F_{\dot{y}\dot{y}} = 2:$

Այսպիսով, հաշվի առնելով (16), (18) և (23) արտահայտությունները, $I_t(t)$ և $I_{tt}(t)$ գործակցիցների արժեքների համար, ըստ (13) -ի, կունենանք հետևյալ արդյունքը.

$$\begin{cases} I_t(t) = (F - \dot{y}F_{\dot{y}})_{\tau=t} = (4y + \dot{y}^2 - \dot{y} \cdot 2\dot{y})_{\tau=t} = (4y - \dot{y}^2)_{\tau=t} = \\ = 2y^t - t^2 - (y^t)^2/t^2, \\ I_{tt}(t) = (-4\dot{y})_{\tau=t} + 2 \cdot (1 + y^t/t^2)^2 \cdot t = 2 \cdot (y^t)^2/t^3 - 2t, \end{cases} \quad (24)$$

որը համընկնում է ուղղակի մեթոդով հաշվարկների (20) արդյունքների հետ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Саакян С.А.** Оценка изменения показателей эффективности в динамических системах управления // Вестник Инженерной академии Армении. - 2005.-Т.2, N1. - С. 131-134.
2. **Камке Э.** Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Наука, 1976. – 576 с.
3. **Смирнов В.И.** Курс высшей математики. Т1.– М.: Наука, 1974.– 480 с.
4. **Петров Ю.П.** Вариационные методы теории оптимального управления. – Л.: Энергия, 1977. – 220 с.

ՀՊՃՀ. Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 18.04.2008.

С.А. СААКЯН, М.К. ДАРАХЧЯН, А.С. СААКЯН

**ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛА В ЗАДАЧАХ ВАРИАЦИОННОГО
ИСЧИСЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ОТКЛОНЕНИЯХ
ГРАНИЧНОГО ЗНАЧЕНИЯ АРГУМЕНТА**

Разработан метод оценки изменения функционала степенным рядом в системах оптимального управления при изменениях граничного значения аргумента.

Ключевые слова: оптимальное управление, динамика, граничные условия, дифференциальное уравнение, показатель эффективности, оценка, аргумент, функционал.

S.A. SAHAKYAN, M.K. DARAKHCHYAN, A.S. SAHAKYAN

**FUNCTIONAL DEVIATION ESTIMATION IN OPTIMAL CONTROL VARIATION
CALCULUS TASKS UNDER DEVIATION OF BOUNDARY VALUE ARGUMENT**

A method of evaluating the functional value change with power series in optimal control systems under the change of boundary value argument is developed.

Keywords: optimal control, dynamics, boundary conditions, differential equation, efficiency index, evaluation, argument, functional.

Э.П. АЩИЯНЦ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИОДА НАГНЕТАНИЯ ГИДРОТАРАНА

Разработана усовершенствованная методика расчета объема воды, нагнетаемой гидротараном в течение одного периода.

Ключевые слова: гидротаран, гидравлический удар, ударный период, рабочий период нагнетания.

Гидравлический таран является водоподъемным устройством, работа которого обусловлена гидравлическим ударом. Простота конструкции и автоматическая работа позволяют использовать это устройство в системах водоснабжения и орошения. Основным недостатком гидротаранов является их низкая производительность, что ограничивает их широкое использование. Поэтому в настоящее время основное внимание исследователей сосредоточено на выявлении путей повышения их производительности.

При работе гидротарана в его напорных водоводах возникают сложные нестационарные процессы [1-3 и др.]. В [1, 2] при определении продолжительности периода нагнетания гидротарана в расчетных зависимостях не учитывается влияние на нестационарный процесс давления, необходимого для открытия нагнетательного клапана, гидравлических сопротивлений и др. факторов.

Целью настоящей работы является детальное исследование периода нагнетания гидротарана и усовершенствование методики расчета.

Гидравлический таран состоит из водоисточника 1, питательного трубопровода 2, рабочей коробки 3 с двумя клапанами 4 и 5, водовоздушного колпака 6, нагнетательного трубопровода 7 и приемного резервуара 8 (рис.1).

Устройство работает следующим образом. При открытии ударного клапана 4 жидкость из водоисточника 1 начинает поступать в питательный трубопровод 2 под напором H_1 . При этом расход жидкости Q_1 затрачивается на создание скорости течения жидкости в питательном трубопроводе, которая удаляется через отверстие ударного клапана 4. По мере увеличения скорости течения увеличивается сила воздействия жидкости на тарель ударного клапана 4, в результате чего последний начинает закрываться. Продолжительность времени от открытия до закрытия ударного клапана называется периодом разгона. На продолжительность периода разгона, в основном, влияет настройка работы ударного клапана 4. С целью повышения производительности гидротарана следует стремиться к созданию в питательном трубопроводе максимально возможной скорости течения жидкости.

При закрытии ударного клапана в питательном трубопроводе 2 возникает гидравлический удар, сопровождающийся значительным повышением давления в конце питательного трубопровода 2. Этот период работы гидротарана называется ударным периодом. Следует отметить, что при закрытии ударного клапана возникает давление, значительно превышающее давление, необходимое для открытия нагнетательного клапана 5. Такое непроизводительное повышение давления уменьшает производительность гидротарана.

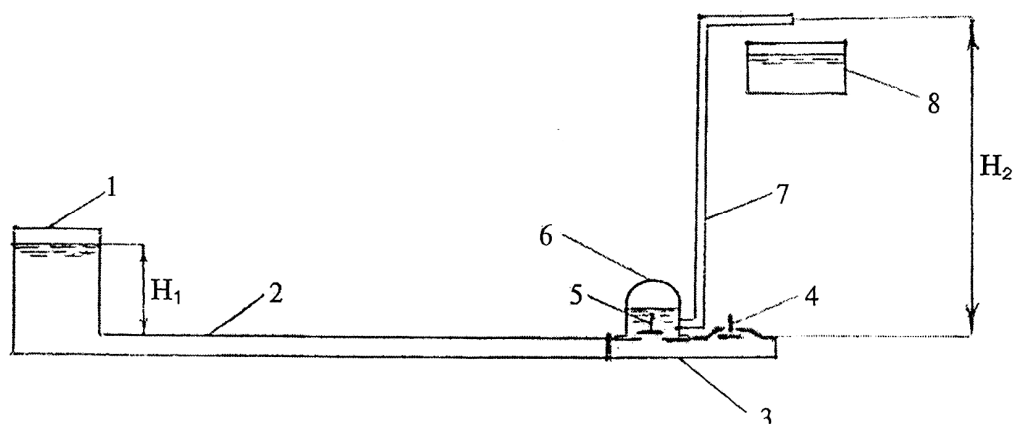


Рис.1. Схема гидротаранной установки: 1- водоисточник, 2 – питательный трубопровод, 3 – рабочая коробка, 4 – ударный клапан, 5 – нагнетательный клапан, 6 – водовоздушный колпак, 7 – нагнетательный трубопровод, 8 – приемный резервуар

Напор H_{OT} , который необходим для открытия нагнетательного клапана, в свою очередь, может значительно превышать напор H_d , необходимый для нагнетания жидкости в водовоздушный колпак 6.

В [4] рекомендуется способ, уменьшающий непроизводительное повышение давления в конце питательного трубопровода при закрытии ударного клапана.

При открытии нагнетательного клапана 5 часть жидкости из питательного трубопровода 2 поступает в водовоздушный колпак 6. В результате в начальный момент открытия нагнетательного клапана 5 давление в конце питательного трубопровода уменьшается до значения, меньшего H_d (рис.2), а затем быстро восстанавливается до значения H_d . Как только в конце питательного трубопровода 2 устанавливается постоянный напор H_d , который незначительно больше высоты нагнетания H_2 , начинается рабочий период нагнетания гидротарана. От продолжительности этого периода зависит производительность гидротарана.

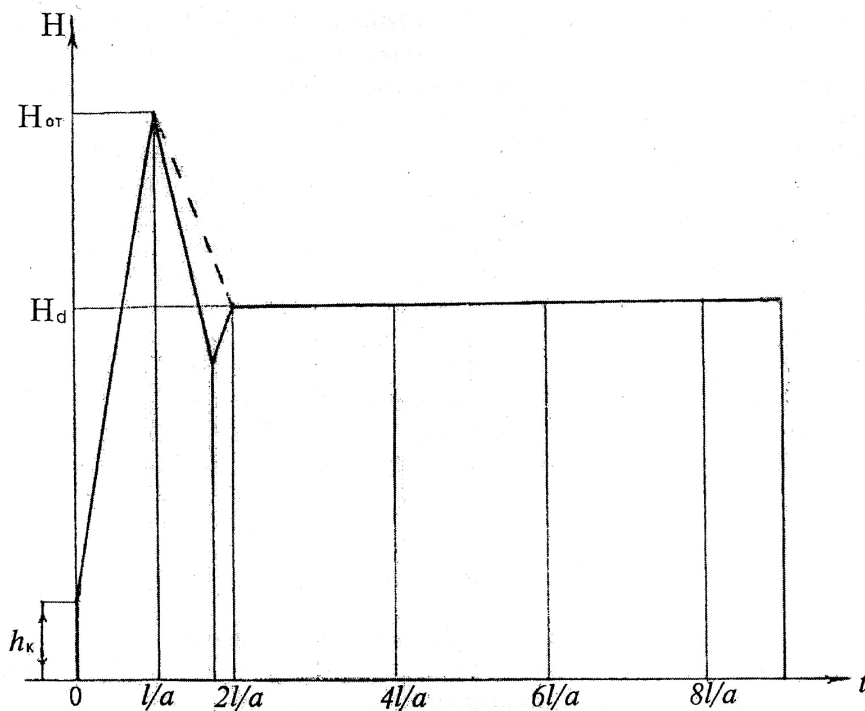


Рис.2. Расчетная диаграмма изменения напора в конце питательного трубопровода

Рассмотрим сначала ударный период работы гидротарана ($0 < t < 2l/a$, рис.2), где l – длина питательного трубопровода, a – скорость распространения волны гидравлического удара. Экспериментальные данные [1] показывают, что время закрытия ударного клапана T_z составляет примерно $0,01...0,02$ с. Для того чтобы в питательном трубопроводе при закрытии ударного клапана возник прямой гидравлический удар, необходимо, чтобы $T_z < 2l/a$.

Из литературных данных [1,2] следует, что оптимальной длиной питательного трубопровода можно считать величину 20 м.

Значение скорости “ a ” зависит от диаметра и толщины стенок трубопровода. Для труб диаметром 75...200 мм среднее значение $a=1150$ м/с. При таких параметрах питательного трубопровода отношение $l/a=0,017$ с и приблизительно равно времени закрытия ударного клапана T_z .

При определении начальных условий для напора в питательном трубопроводе необходимо, чтобы перед началом закрытия ударного клапана напор в конце питательного трубопровода ($x=l$) был равен $\xi_{y.k.} = \bar{\xi}_{y.k.} \frac{V_c^2}{2g}$, где $\xi_{y.k.}$ – коэффициент гидравлического сопротивления ударного клапана, V_c – скорость

течения жидкости в питательном трубопроводе в момент начала закрытия ударного клапана.

Если не учитывать потери напора при входе в питательный трубопровод ввиду их незначительности, то до гидравлического удара распределение напора в трубопроводе будет иметь вид

$$H(0,t) = H_1 - x(H_1 - h_K)/l. \quad (1)$$

Предполагается также, что при $t = 0$ $\frac{\partial H}{\partial t} = 0$.

Что касается граничных условий в питательном трубопроводе при нестационарном процессе, то отметим, что в начале питательного трубопровода ($x = 0$) все время сохраняется постоянный напор $H(0,t) = H_1$.

На рис. 2 показана расчетная диаграмма изменения напора в конце питательного трубопровода в течение периода нагнетания, которая используется в качестве второго граничного условия ($x = l$).

Для определения изменения напора и скорости в питательном трубопроводе при гидравлическом ударе используется система дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} -\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}, \\ -\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x}, \end{cases} \quad (2)$$

где $H(x,t)$ - напор в трубопроводе; $V(x,t)$ - средняя скорость течения жидкости; x - координата оси трубопровода; t - текущее время; g - ускорение силы тяжести.

Из системы (2) получаем волновое уравнение вида

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}, \quad (3)$$

которое интегрируется методом Фурье при следующих начальных и граничных условиях:

- для промежутка времени $0 < t \leq 2l/a$:

$$\begin{cases} H(0,t) = H_1 - x(H_1 - h_K)/l, & \partial H / \partial t = 0, \\ H(0,t) = H_1, & H(l,t) = h_K + (H_{OT} - h_K)t/T_3, \end{cases} \quad (4)$$

где $T_3 = l/a$.

В результате интегрирования получаем следующую зависимость для напора:

$$H(x, t) = H_1 + \frac{x}{l} [h_K + (H_{OT} - h_K)t / T_3 - H_1] + \frac{2(H_{OT} - h_K)l}{\pi^2 a T_3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi}{n^2} \sin \frac{n\pi at}{l} \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (5)$$

Имея зависимость для напора и используя систему уравнений (2), определяем соответствующее изменение скорости течения жидкости в питательном трубопроводе:

$$V(x, t) = V_c - \frac{g(H_{OT} - h_K)x^2}{2a^2 T_3 l} + \frac{2g(H_{OT} - h_K)l}{\pi^2 a T_3} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi}{n^2} \cos \frac{n\pi at}{l} (\cos \frac{n\pi x}{l} - 1). \quad (6)$$

Для определения изменения напора в промежутке времени $T_3 < t < 2l/a$ из зависимости (5) при $t = T_3$ определяем новые начальные условия, а граничные условия для напора имеют вид

$$H(0, t) = H_1, \quad H(l, t) = H_{OT} - (H_{OT} - H_d)t / T_{OT}, \quad (7)$$

где $T_{OT} = l/a$.

Поступая так же, как и в предыдущем случае, получаем новые зависимости для напора и скорости:

$$H(x, t) = H_1 + \frac{x}{l} [H_{OT} - (H_{OT} - H_d)t / T_{OT} - H_1] + \frac{2l}{g\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(H_{OT} - h_K)}{T_3} (1 - \cos n\pi) - \frac{(H_{OT} - H_d)}{T_{OT}} \cos n\pi \right] \times \frac{1}{n^2} \sin \frac{n\pi at}{l} \cdot \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad (8)$$

$$V(x, t) = V_c - \frac{g(H_{OT} - h_K)t}{aT_3} + \frac{g(H_{OT} - H_d)x^2}{2a^2 T_{OT} l} + \frac{g}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(H_{OT} - h_K)}{T_3} (1 - \cos n\pi) - \frac{(H_{OT} - H_d)}{T_{OT}} \cos n\pi \right] \times \frac{1}{n^2} \cos \frac{n\pi at}{l} (\cos \frac{n\pi x}{l} - 1), \quad (9)$$

где $T_{OT} = l/a$.

При $t > 2l/a$ в конце питательного трубопровода (рис. 2) устанавливается постоянный напор H_d . Этот период работы гидротарана называется рабочим периодом нагнетания.

Изменение напора и скорости в течение этого периода определяем с учетом влияния гидравлических сопротивлений. Для этого используем систему уравнений гидравлического удара, предложенную И.А. Чарным [5]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{1}{g} \left(\frac{\partial V}{\partial t} + 2mV \right), \\ -\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x}, \end{cases} \quad (10)$$

из которой получаем дифференциальное уравнение для напора вида

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} + 2m \frac{\partial H}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}, \quad (11)$$

где $m = \frac{\lambda_0 V_1}{4D}$, λ_0 – коэффициент гидравлических сопротивлений при стационарном режиме движения; D – диаметр питательного трубопровода; V_1 – скорость течения жидкости в конце питательного трубопровода, которая определяется из (9) при $t = l/a$:

$$V_1 = V_c - \frac{g}{2a} (H_d - h_K). \quad (12)$$

Для интегрирования уравнения (11) начальные условия определяем из (8) при $t = l/a$, а граничные условия имеют вид

$$H(0, t) = H_1, \quad H(l, t) = H_d. \quad (13)$$

В результате интегрирования получена следующая зависимость для напора:

$$\begin{aligned} H(x, t) = & H_1 + \frac{x}{l} (H_d - H_1) - \\ & - \left[\frac{(H_{OT} - h_K)}{T_3} + \frac{(H_{OT} - H_d)}{T_{OT}} \right] \frac{4e^{-mt}}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{kq_k} \sin q_k \sin \frac{n\pi x}{l}. \end{aligned} \quad (14)$$

Соответствующая зависимость для скорости имеет вид

$$\begin{aligned} V(x, t) = & V \cdot e^{-2mt} - \frac{g(H_d - H_1)(1 - e^{-2mt})}{2ml} - \\ & - \frac{4Ue^{-mt}}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k-1)^2} \cos q_k t \cos \frac{(2k-1)\pi x}{l}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{где } U = \frac{g[2H_{OT} - (H_d + h_K)]}{a}, \quad q_k = \sqrt{\left[\frac{(2k-1)\pi a}{l} \right]^2 - m^2}.$$

При $x = l$ зависимость (15) принимает вид

$$V(l, t) = V \cdot e^{-2mt} - \frac{g(H_d - H_1)(1 - e^{-2mt})}{2ml} + \frac{4Ue^{-mt}}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k-1)^2} \cos \frac{(2k-1)\pi at}{l}. \quad (16)$$

Приравнявая уравнение (16) к нулю, определяем продолжительность рабочего периода нагнетания. В первом приближении продолжительность этого периода определяется по формуле

$$T_H^1 = \frac{(V_1 - U/2)l}{g(H_d - H_1)}. \quad (17)$$

Путь, проходимый колонной жидкости в конце питательного трубопровода, после открытия нагнетательного клапана определяется с помощью зависимости

$$S(l, t) = V_1 \frac{(1 - e^{-2mt})}{2m} + \frac{g(H_d - H_1)}{l} \left[\frac{1 - e^{-2mt} - 2mt}{4m^2} \right] + \frac{4Ue^{-mt}}{a \pi^3} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k-1)^3} \sin \frac{(2k-1)\pi at}{l}. \quad (18)$$

Подставляя в (18) вместо t значение T_H , определенное из (16), вычисляем путь, пройденный колонной жидкости в процессе рабочего периода нагнетания.

Объем жидкости, нагнетаемой в водовоздушный колпак, равен

$$W_H = S(l, T_H) \cdot A, \quad (19)$$

где A – площадь поперечного сечения питательного трубопровода.

Заметим, что после того, как определено значение V_1 , при неучете влияния гидравлических сопротивлений объем жидкости, нагнетаемой в водовоздушный клапан, можно определить, приравнявая кинетическую энергию колонны жидкости в питательном трубопроводе к потенциальной энергии нагнетания. При этом имеет место равенство

$$\frac{m_T V_1^2}{2} = m_H g(H_d - H_1), \quad (20)$$

где m_T – масса жидкости в питательном трубопроводе, $m_T = W_T \rho$; W_T – объем жидкости в питательном трубопроводе; ρ – плотность жидкости,

$$m_H = W_H \rho.$$

Подставляя значения m_T и m_H в (20), получим

$$W_H = \frac{W_T V_1^2}{2g(H_d - H_1)}. \quad (21)$$

Как видно из (21), объем жидкости, нагнетаемой гидротараном, пропорционален массе жидкости в питательном трубопроводе и квадрату скорости течения жидкости в нем.

Увеличение массы жидкости в питательном трубопроводе диктуется конструктивной и экономической целесообразностью. Что касается скорости течения жидкости V_t , то она во всех случаях должна быть больше единицы. Поэтому при заданном расходе диаметр питательного трубопровода необходимо выбрать таким образом, чтобы это условие выполнялось.

Приведем численный пример. Предположим, гидротаранная установка имеет следующие численные значения параметров: $H_1 = 3 \text{ м}$, $H_2 = 3 \text{ м}$, $H_d = 13 \text{ м}$, $H_{OT} = 18 \text{ м}$, $l = 20 \text{ м}$, $D_T = 0.2 \text{ м}$, $a = 1200 \text{ м/с}$, $\xi = 7$, $V_c = 2 \text{ м/с}$, $\lambda_0 = 0,025$.

Подставляя численные значения, получим

$$\text{Значение } h_K = \xi_{y.k.} \frac{V_c^2}{2g}, \quad h_K = \frac{7 \cdot 2^2}{2 \cdot 9,81} = 1,425 \text{ м}.$$

Значение V_1 определяем по формуле (12):

$$V_1 = 2 - \frac{9,81(18 - 1,425)}{2 \cdot 1200} = 1,932 \text{ м/с},$$

$$m = \frac{\lambda_0 V_1}{4D}, \quad m = \frac{0,025 \cdot 1,932}{4 \cdot 0,2} = 0,06 \text{ м/с},$$

$$U = \frac{g[2H_{OT} - (H_d + h_K)]}{a}, \quad U = \frac{9,81[2 \cdot 18 - (13 + 1,425)]}{1200} = 0,177 \text{ м/с}.$$

Значение T_H^1 определяем по формуле (17):

$$T_H^1 = \frac{(1,932 - 0,0883) \cdot 20}{9,81(13 - 3)} = 0,376 \text{ с}.$$

При указанном значении T_H : $V(l, T_H^1) = 0$.

Подставляя $T_H = 0,376 \text{ с}$ в уравнение (18), получим

$$S(l, T_H) = 0,357 \text{ м}.$$

Объем воды, нагнетаемой гидротараном за один рабочий период, равен

$$W_H = S(l, T_H) \cdot A, \quad W_H = 0,375 \cdot 0,785 \cdot 0.2^2 = 0,0118 \text{ м}^3.$$

Расчеты показывают, что гидравлические сопротивления уменьшают производительность гидротарана. Однако, так как продолжительность периода нагнетания незначительна, то их влияние на уменьшение объема нагнетаемой жидкости незначительно.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Получены аналитические зависимости, определяющие изменение давления и скорости в питательном трубопроводе при ударном и рабочем периодах нагнетания.
2. Рекомендуются простая формула (21), определяющая объем жидкости, нагнетаемой гидротараном за один период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чистопольский С. Д.** Гидравлические тараны. –М.-Л., 1936. – 151 с.
2. **Овсебян В.М.** Гидравлический таран и таранные установки – М.: Машиностроение, 1968. – 124с.
Саруханян А.А. Гидравлические исследования гидротаранных машин и турбонасоса с целью их использования для наполнения мягких гидротехнических сооружений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ереван, 1981. – 22 с.
3. **Աշիյանց Է.Պ.** Հիդրավլիկական բաբան. Հայաստանի Հանրապետության արտոնագիր. N 1644-A2, MAD 7F04F07/02, 2005:
4. **Чарный И.А.** Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах.-М.: Недра, 1975. – 296с.

ЗАО “Институт водных проблем и гидротехники им. академика И.В. Егиязарова”.
Материал поступил в редакцию 14.05.2007.

Է.Պ. ԱՇԻՅԱՆՑ

ՀԻԴՐԱՎԼԻԿԱԿԱՆ ԲԱԲԱՆԻ ՆԵՐՄՈՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿԱՄԻՋՈՑԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Մշակված է կատարելագործված վերլուծական մեթոդ՝ հիդրոբաբանի մեկ ներմղման ժամանակամիջոցում ներմղող ջրի ծավալը որոշելու համար:

Առանցքային բառեր. հիդրավլիկական բաբան, հիդրավլիկական հարված, ներմղման շրջան, բանվորական ներմղման շրջան:

ED. P. ASHCHYANTS

THE HYDROTARAN PERIOD OF FORCING INVESTIGATION

An advanced technique for calculating water volume forced by hydrotaran during one period of forcing is developed.

Keywords: hydrotaran, water-hammer, period of forcing.

Э.А. ДАСТАКЯН, Р.С. ОВСЕПЯН, Д.Р. ОВСЕПЯН,
А.М. МЕЛИКДЖАНИЯН

АКТИВНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ОДНОМЕРНОЙ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В ДВИЖУЩЕЙСЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

Рассматривается одномерная задача активной компенсации шума в трубе при поступательно движущейся однородной воздушной среде. Выявлено, что при скоростях потока, больших скорости звука, как в длинных трубах, так и в трубах конечной длины не возникает акустическая обратная связь.

Ключевые слова: активная компенсация шума, акустическая обратная связь, плоская волна, монополь, диполь, волновод, труба, громкоговоритель, микрофон.

При активной компенсации шума (АКШ) акустическая обратная связь (АОС) между компенсирующими излучателями и управляющими их работой приемниками при определенных условиях приводит к генерации системы контроля и срыву процесса гашения. Устранения или ослабления АОС можно добиться сведением к минимуму воздействия излучателя на приемник, выделением компенсирующего шума из суммарного сигнала (формируемого источником шума и компенсирующим излучателем) и соответствующими схемными решениями электрического тракта системы гашения.

В реальных системах ослабления АОС можно добиться увеличением количества дискретно распределенных однонаправленных излучателей, формирующих поверхности Гюйгенса [1-5]. Однако увеличение количества компенсаторов приводит к усложнению системы контроля.

Ослабление АОС проще осуществить в длинных одномодовых волноводах с применением однонаправленных излучателей и приемников [3,6,7]. В работе [6] в качестве однонаправленного приемника (излучателя) использованы два идентичных приемных (излучающих) монополя, расположенных в разных сечениях волновода. При этом для каждого монополя введены определенные сдвиги фаз. Однонаправленность приемника (излучателя) можно также формировать расположением монополя и диполя в одном сечении волновода [7].

АОС можно ослабить также установлением микрофона между двумя громкоговорителями, которые располагаются вдоль трубы на расстоянии половины длины подавляемой волны [8]. При этом микрофон воспринимает лишь уровень звукового давления гасимого звука.

Для более эффективной компенсации звука предлагается использовать две подобные схемы формирования гасящего звукового колебания, в которых электроакустические преобразователи расположены один за другим вдоль оси канала [9].

Указанными путями с применением однонаправленных излучателей и приемников гашение звука без АОС можно производить в открытом пространстве или в длинных трубах. При наличии отражающих поверхностей возможна связь между

приемником и излучателем. В частности, в трубе конечной длины отражения от ее концов могут привести к неустойчивости системы гашения. В этом случае ослабления АОС можно добиться соответствующим расположением приемника (микрофона) относительно компенсатора (громкоговорителя) [10]. Микрофон располагается в точке, где наблюдается минимальный уровень звукового давления поперечных мод, возбуждаемых громкоговорителем. При этом критерий устойчивости Найквиста соблюдается лишь в определенном диапазоне частот.

В трубе конечной длины отражения от ее концов при применении даже однонаправленных излучателей и приемников приводят к возникновению АОС. Кроме этого, изменения в окружающей среде (отражения от различных поверхностей в среде) через концы трубы влияют на стабильность работы системы гашения. Устранения этих недостатков можно добиться выделением первичной волны источника шума при помощи двух микрофонов, воспринимающих суммарное звуковое давление от излучателя и источника шума [11]. При этом минимальная длина трубы ограничивается необходимостью формирования компенсатором плоской волны. Однако данным способом невозможно произвести компенсацию в широких трубах, помещениях, в открытом пространстве при наличии отражающих поверхностей. Кроме того, изменение отражательной способности входа трубы может привести к неустойчивости системы.

Устранения АОС можно добиться (помимо указанных акустических мер) также соответствующими схемными решениями электрического тракта системы гашения. В системе АКШ приемник (микрофон) воспринимает сигналы от компенсатора (громкоговорителя) и источника шума. Из суммарного сигнала микрофона в электрической цепи системы вычитается вклад громкоговорителя, и на его вход подается лишь сигнал источника шума, чем и достигается вышеуказанная цель [12-14]. Однако изменение характера шума или изменения в среде гашения (изменения температуры, характера отражений и т.п.) приводят к возникновению АОС.

Вышеуказанные меры по устранению АОС имеют ограничения, которые не во всех случаях позволяют добиться положительного результата.

В движущихся средах при определенных скоростях АОС не возникает, что можно использовать для упрощения процесса гашения.

Рассмотрим одномерную задачу гашения звуковых колебаний, распространяющихся в однородной поступательно движущейся воздушной среде в трубе бесконечной длины.

Пусть в трубе бесконечной длины с жесткими стенками воздушный поток движется со скоростью V (рис.). Предположим, что под действием внешней силы (источник силы неподвижен относительно стенок трубы) частицы среды в сечении $z = 0$ колеблются с одинаковой скоростью

$$v = v_0 e^{i\omega t}. \quad (1)$$

Тогда в положительном и отрицательном направлениях оси z от точки 0 распространяются одномерные гармонические плоские волны [15, с.332]. При этом внешние силы не препятствуют прохождению волн через сечение $z = 0$.

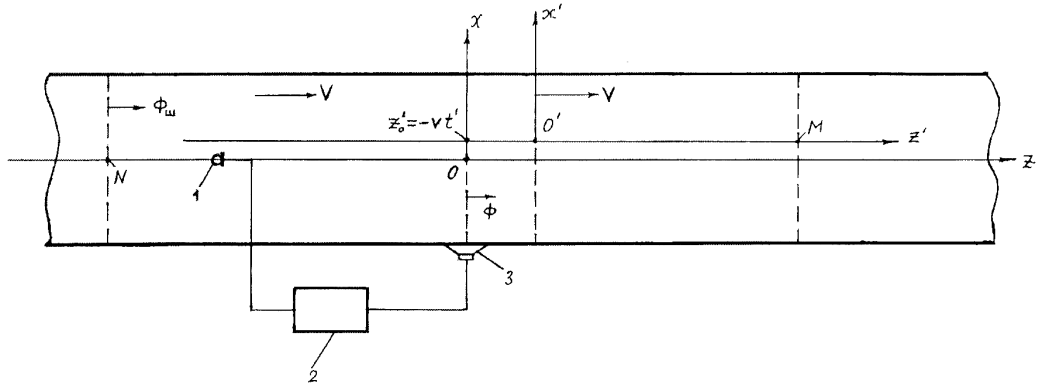


Рис. Компенсация волны в одномодовой трубе

В системе координат $O'Z'$, движущейся со скоростью V вместе с потоком ($O'Z'$ неподвижна относительно движущейся среды), звуковое поле в трубе, согласно [15-17], описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z'^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

где Φ – потенциал скорости.

Источник (1), формирующий данное звуковое поле, движется в отрицательном направлении оси $O'Z'$ со скоростью V и в моменты времени t' с точек сечения $z'_0 = -Vt'$ излучает звуковые волны, которые достигают сечения $z = z'_M$ в моменты времени t . Поэтому для волн, распространяющихся в положительном направлении оси Z' , граничное условие для уравнения (2), согласно (1), представляется в виде

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z'} \Big|_{z' = -Vt'} = -v_0 e^{i\omega t'}.$$

Тогда решение уравнения (2) будет

$$\Phi = \frac{v_0}{ik} e^{i(\omega' t - k' z)}, \quad (3)$$

$$\text{где } \omega' = \frac{\omega}{1 + \frac{V}{c}}, \quad k' = \frac{\omega'}{c}, \quad k = \frac{\omega}{c}.$$

Если перейти к неподвижной системе координат OZ , используя связь между системами $z = z' + Vt$, то выражение (3) принимает следующий вид:

$$\Phi = \frac{v_0}{ik} e^{i\left(\omega t - \frac{\omega}{c+V} z\right)} \quad (z \geq 0). \quad (4)$$

Следовательно, колебания, возбуждаемые сторонними силами в сечении $z = 0$, передаются в точку наблюдения z со скоростью $c + V$ (при волне, распространяющейся в положительном направлении оси z) без изменения частоты колебания ω в неподвижной системе координат. Отметим, что выражение (4) можно было получить, используя запаздывающие потенциалы [18].

Для волны, распространяющейся в отрицательном направлении оси OZ вышеизложенным путем при граничном условии

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z' = -Vt'} = v_0 e^{i\omega t'},$$

выражение для потенциала скорости можно представить в виде

$$\Phi = \frac{v_0}{ik} e^{i\left(\omega t + \frac{\omega}{c+V}z\right)} \quad (z \leq 0). \quad (5)$$

При $V < c$ в трубе устанавливаются две волны (4) и (5), распространяющиеся от точки 0 (см. рис.) в противоположных направлениях. При $V \ll c$ эти выражения описывают звуковые поля в неподвижной среде.

При $V = c$ время передачи колебания (5) в точку наблюдения z (отрицательные значения z) будет бесконечно большой величиной ($\tau = \frac{z}{c-V} = \infty$).

Поэтому колебания не будут достигать данной точки. В этом случае существует одна волна (4), распространяющаяся от точки $z = 0$ в положительном направлении оси z .

При $V > c$ знак перед вторым членом в скобке выражения (5) меняется на противоположный. В этом случае выражение (5) описывает колебание, распространяющееся со скоростью $V - c$, только в положительном направлении оси z . Колебания, излучаемые из точек сечения $z = 0$ в отрицательном направлении оси z , при $V > c$ как бы сносятся потоком воздуха и распространяются в положительном направлении.

Тогда при $z > 0$ будет распространяться следующая волна:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{v_0}{ik} \left[e^{i\omega\left(t - \frac{z}{c+V}\right)} + e^{i\omega\left(t - \frac{z}{V-c}\right)} \right] = \\ &= \frac{2v_0}{ik} \cos \frac{\omega z}{c\left(\frac{V^2}{c^2} - 1\right)} e^{i\omega\left[t - \frac{z}{V(1-c^2/V^2)}\right]}. \end{aligned} \quad (6)$$

Следовательно, возбуждая в сечении трубы $z = 0$ звуковые колебания, справа от этого сечения можно сформировать звуковые поля (4) и (6) соответственно при $V = c$ и

$V > c$, а слева – звуковую тень. При $V < c$ звуковая тень не образуется. Иначе, в трубе при $V \geq c$ возможно лишь одностороннее излучение звуковых колебаний.

Такое формирование звукового поля при $V \geq c$ можно использовать для устранения АОС в системах АКШ.

Колебания, возбуждаемые источниками шума в трубе при $V \geq c$, могут быть как вида (4), так и (6). Рассмотрим случай плоской волны, распространяющейся от сечения $Z = Z_N$ в положительном направлении оси Z трубы (см. рис.). Согласно (4), его можно представить в виде

$$\Phi_N = A_N e^{i\omega\left(t - \frac{z + |z_N|}{c + V}\right)},$$

где

$$A_N = \frac{v_0}{ik}, \quad z \geq -z_N. \quad (7)$$

Выявим возможность компенсации волны (7) колебаниями (4), (6), возбуждаемыми вышеуказанными внешними сигналами, при различных значениях скорости потока V .

1. При $V = c$, согласно (4), можно сформировать плоскую волну

$$\Phi = A e^{i\left[\omega\left(t - \frac{z}{2c}\right)\right]}, \quad z > 0, \quad A = \frac{v_0}{ik}. \quad (8)$$

При наложении звуковых полей (7) и (8) в области $z > 0$ наблюдается их полная компенсация, когда соблюдаются условия

$$A_N = A, \quad \varphi = \omega|z_N|/2c + \pi(2n+1), \quad n = 0, 1, 2... \quad (9)$$

2. При $V > c$ поле источника шума (7) компенсируется полем (6) в области $z > 0$ при соблюдении следующих условий:

$$A_N = K \cdot A, \quad \text{где} \quad A = \frac{2V_0}{ik} \cos \frac{kz}{\frac{V^2}{c^2} - 1}, \quad K = \frac{1}{2 \cos \frac{kz}{\frac{V^2}{c^2} - 1}}, \quad (10)$$

$$\varphi = \pi(2n+1) + \omega|z_N|/V + c - \omega z c / V^2 - c^2, \quad n = 0, 1, 2...$$

Из (10) видно, что фаза φ и коэффициент усиления компенсирующего сигнала K зависят от Z . Поэтому подавление колебания с заданной степенью компенсации возможно в отдельных областях по длине трубы. В частности, возможна компенсация колебаний, излучаемых с выхода трубы. Условия компенсации определяются выражениями (10) при подстановке в них координаты конца трубы ($z = l$). Отметим, что не наблюдается обратная волна, отраженная от конца трубы, так как она выносится наружу потоком воздуха.

Как отмечено выше, источники шума могут формировать в трубе при $V > c$ также волну типа (6). Допустим, волна распространяется от сечения $Z = Z_N$ в положительном направлении оси Z . Тогда поле источника шума определяется выражением (6), где к переменной Z прибавляется величина $|Z_N|$. Несложно показать, что сумма звукового поля источника шума и компенсирующего поля (6) равна нулю (т.е. происходит их полная взаимная компенсация) в области $Z > 0$ при соблюдении условий

$$\frac{\omega |Z_N| c}{V^2 - c^2} = 2\pi n, \quad \varphi = \frac{|Z_N| \omega V}{V^2 - c^2} + \pi(2n+1), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (11)$$

где Φ – фаза компенсирующей волны.

Из (11) вытекает, что компенсация не зависит от длины трубы в отличие от компенсации в неподвижных средах, где на ее эффективность воздействуют отражения от концов трубы. В данном случае, как показано выше, при $V \geq c$ отражения от концов трубы отсутствуют, что облегчает задачу компенсации.

Следует отметить, что если источник шума возбуждает волну типа (7), то ее можно, при необходимости, превратить в волну вида (6) и потом компенсировать ее по всей длине трубы, а также излучение с ее выхода. Такое превращение можно осуществить, формируя соответствующие ответвления трубы.

Во всех перечисленных случаях, помещая приемник звуковых колебаний (микрофон) 1 (см. рис.) в области $Z < 0$, где потенциал скорости компенсатора $\Phi = 0$, можно избежать генерации гасящей системы, так как в этом случае излучение компенсатора не попадает в микрофон, т.е. отсутствует АОС. При этом колебания источника шума воспринимаются микрофоном 1 и после соответствующей амплитудно-фазовой регулировки (соблюдение условий (9)-(11)) в блоке 2 подаются на компенсатор 3 (громкоговоритель), формирующий соответствующие колебания в сечении трубы $Z = 0$.

Необходимо отметить, что изменения в окружающей среде (температурные изменения, изменения уровня отражений от различных предметов и т.д.) не влияют на уровень компенсации, так как микрофон воспринимает лишь уровень первичного подавляемого шума. При аналогичной компенсации в неподвижной среде [6-11] указанные факторы влияют на компенсацию, так как микрофон воспринимает как первичный шум, так и отражения от концов трубы, отражения от различных предметов вне среды (при коротких трубах) и излучение от компенсатора.

Расположив микрофон вблизи громкоговорителя, можно производить АКШ простым инвертированием. Тогда система компенсации будет состоять из микрофона, инвертора и громкоговорителя в отличие от известных устройств [6-12], где требуются дополнительно громкоговорители, микрофоны, линии задержки, фильтры, блоки формирования передаточной функции электрической цепи контроля и т.п.

При скоростях потока $V < c$ между микрофоном и громкоговорителем возникает АОС. АОС можно устранить повышением скорости потока воздуха до сверхзвуковых соответствующим сужением сечения трубы или расположением в ней по ее сечению необходимого количества трубочек меньшего диаметра.

Таким образом, при сверхзвуковых скоростях потока воздуха ($V \geq c$) в трубе можно полностью устранить АОС соответствующим расположением приемника и компенсатора гасящей системы, что значительно облегчает техническую реализацию АКШ. При этом возможна полная компенсация звукового поля как в длинных трубах, так и в трубах конечной длины и излучений с их выходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Swinbanks M.A.** The active control of sound propagation in long ducts // Sound and Vibration. – 1973. – V.27, № 3. – P. 411-436.
2. **Урусовский И.А.** Об активной звукоизоляции в волноводе // Акуст. журн. – 1977. – Т. 23, № 2. – С. 304-312.
3. **Завадская М.Б., Попов А.В., Эгельский Б.Л.** Вопросы аппроксимации и устойчивости систем активного гашения с конечным числом связей // Акуст. журн. – 1977. – Т. 23, № 3. – С. 480-482.
4. **Коротаев Е.В., Тютюкин В.В.** Экспериментальное исследование активной гасящей системы плоской формы // Акуст. журн. – 2000. – Т. 46, № 1. – С. 84-88.
5. **Бойко А.И., Тютюкин В.В.** Плоская активная система гашения звука, основанная на применении двумерных пространственных гармоник // Акуст. журн. – 2004. – Т. 50, № 1. – С. 5-13.
6. **Мазанников А.А., Тютюкин В.В.** Об эффективности и устойчивости автономных активных систем гашения звука // Акуст. журн. – 1978. – Т. 24, № 5. – С. 788-790.
7. **Урусовский И.А.** О самовозбуждении системы активной звукоизоляции в волноводе // Акуст. журн. – 1977. – Т. 23, №3. – С. 437-442.
8. **Eghesadi Kh., Leventhall H.G.** Active attenuation of noise: the Chelsea dipole // Sound and Vib. – 1983. – V. 75, №1. – P. 127-134.
9. **Hong W.K.W., Eghesadi Kh., Leventhall H.G.** The tandem tight-coupled active noise attenuator in a duct // Acoust. Lett. – 1982. – V. 6, № 2. – P. 19-24.
10. **Trinder M.C.J., Nelson P.A.** Active noise control in finite length ducts // Sound and Vib. – 1983. – V. 89, № 1. – P. 95-105.
11. **Liu S., Juan J., Fung K.-Y.** Robust active control of broadband noise in finite ducts // Acoust. Soc. Am. – 2002. – V. 111, № 6. – P. 2727-2734.
12. **Nelson P.A., Elliott S.J.** Active control of Sound. – London: Academic Press Ltd., 1992.
13. **Leboucher E., Micheau P., Berry A., L'Esprance A.A.** Stability analysis of a decentralized adaptive feedback active control system of sinusoidal sound in free space // Acoust. Soc. Am. – 2002. – V. 111, № 1. – P. 189-199.
14. А.с. 590807 СССР. МКИ G10K 11/00. Устройство для подавления шума / **Р.С. Овсепян, Э.А. Дастакян, Т.Г. Гаспарян, Э.А. Нагапетян.** – Оpubл. 30.01.78. – Бюл. № 4.
15. **Лепендин Л.Ф.** Акустика. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
16. **Докучаев В.П.** Энергия и сопротивление излучения движущегося акустического монополя // Акуст. журн. – 1996. – Т. 12, № 1. – С. 112-114.

17. **Блохинцев Д.И.** Акустика неоднородной движущейся среды .- М.: Наука, 1981.- 208 с.
18. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Теория поля.- М.: Наука, 1973.- 504 с.

“Канакер-Зейтун” МЦ ЗАО НИИ гигиены и профзаболеваний. Материал поступил в редакцию 10.03.2008.

**Է.Ա.ԴԱՍՏԱԿՅԱՆ, Ռ.Ս.ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ, Դ.Ռ.ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ,
Ա.Մ.ՄԵԼԻՔՋԱՆՅԱՆ**

**ՄԻԱՉԱՓ ՉԱՅՆԱՅԻՆ ԱԼԻՔԻ ԱԿՏԻՎ ԿՈՄՊԵՆՍԱՑՈՒՄԸ ՇԱՐԺՎՈՂ ՕԴՆԱՅԻՆ
ՄԻՋԱՎԱՅՐՈՒՄ**

Դիտարկվում է խողովակում համասեռ օդային հոսքի դեպքում ԱԱԿ-ի միաչափ խնդիրը: Սահմանված է, որ հոսքի գերձայնային արագությունների դեպքում ՁՀԿ-ը չի առաջանում ինչպես երկար, այնպես էլ վերջավոր երկարության խողովակներում:

Առանցքային բառեր. աղմուկի ակտիվ կոմպենսացիա, ձայնական հետադարձ կապ, հարթ ալիք, մոնոպոլ, դիպոլ, ալիքատար, խողովակ, բարձրախոս, միկրոֆոն:

**E.A. DASTAKYAN, R.S. HOVSEPYAN, D.R. HOVSEPYAN,
A.M. MELIQJANYAN**

**ACTIVE CONTROL OF ONE-DIMENSIONAL SOUND WAVE IN MOVING
ENVIRONMENT**

One-dimensional problem of active control of sinusoidal sound oscillations in progressively moving homogeneous air environment of duct is considered. It is shown that AF doesn't appear both in long and in finite ducts at velocities of air stream greater than sound velocity.

Keywords: active noise control, acoustic feedback, plane wave, monopole, dipole, waveguide, duct, loudspeaker, microphone.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ Ո.Զ.

ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ՔԱՅԼՔԸ ՇԱՐՈՒՆԱԿՎՈՒՄ Է 351

ԴՐԱՉԵՎ Օ.Ի., ՏԱՐԱՆԵՆԿՈ Գ.Վ., ՏԱՐԱՆԵՆԿՈ Վ.Ա., ՄՎԻՑ Ա.

ԹՌԹՐԱԳԱՅԼԻԿՈՆՄԱՄԲ ԱՆՑՔԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ ԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅԱՆ ՀԻՄՆԱՎՈՐՈՒՄ 359

ԱՐԶՈՒՄԱՆՅԱՆ Ա.Մ.

ԿՏՐՈՂ ԹԻԹԵՂԻԿԻ ԵՎ ՄՇԱԿՎՈՂ ԴԵՏԱԼԻ ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ
ԴԱՇՏԻ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՄՈՏԵՅՈՒՄ 371

ԱԲՐԱՄՅԱՆ Վ.Ղ., Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ, Ս.Ն. ԵՆԳԻԲԱՐՅԱՆ

ՈՒԵՆԼՈԳԻԱԿԱՆ ՊԱՅԹՅՈՒՆԻՉ ՀԱՐՈՒՅՄԱՆ ԷԼԵԿՏՐԱԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ
ՄԵԽԱՆԻԶՄ 377

ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Վ.Հ., ՀԱԿՈԲՅԱՆ Ն.Ն., ԱՅՎԱԶՅԱՆ Ա.Ա., ՄԱՍՈՒՆՅԱՆ Մ.Է.

ՏԱՊԱՍԱՐԻ ՔՐՈՄԻՏԱՅԻՆ ՀԱՆՔԱՆՅՈՒԹԵՐԻ ՌԵԱԿՑԻՈՆ
ԿԱՐՈՂՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՄԻՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ 383

ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Հ.Ս., ԹՈՒՄԱՆՅԱՆ Գ.Ա., ՂՈՒԿԱՍՅԱՆ Վ.Ս.

ՓՈՇԵՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ՄԱՇԱԿԱՅՈՒՆ ԿՈՆՍՏՐՈՒԿՑԻՈՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ
ՍՏԱՅՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱ. ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ ԵՎ
ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱԳՈՅԱՅՈՒՄ 393

ԹԱԴԵՎՈՍՅԱՆ Ա.Վ., ՀԱՄԲԱՐԶՈՒՄՅԱՆ Ա.Յ., ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ Ա.Ռ., ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ Ա.Ա., ՇԱՄԻՅԱՆ Ա.Գ.

ԾԱՆՐ ՄԵՏԱՂՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՃԵՊԸՆԹԱՑ ԵՂԱՆԱԿ 402

ՄԱՐԳՍՅԱՆ Լ.Ե., ԱՂԱՅԱՆ Ա.Ա.

ՏԵՂԱԿԱՆ ԱՌԱՋՆԱՅԻՆ ԿԱՊԱՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱԶՏՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ
ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ 407

ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Ա.Հ., ԶԱՔԱՐՅԱՆ Ա.Ս., ԱԼԱՎԵՐԴՅԱՆ Հ. Հ.

ՎԱՐԸՆԹԱՑ ՇԵՐՏԵՐՈՎ ԵՎ ՊԵՐԱՅՈՂ ԼՅԱՆՅՈՒԹԻ ԼՅՄԱՄԲ ՄՇԱԿՄԱՆ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ՈՒ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ
ՏԱՐԻԵՐԻ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՀԻՄՆԱՎՈՐՈՒՄԸ 412

ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Վ.Ս., ԲԱԴԱԼՅԱՆ Ն.Պ., ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Կ.Վ., ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Ս.Է.

ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ՖՈՒՆԿՑԻԱՅԻ ԿԱՌՈՒՑՈՒՄԸ՝
ԿԱԽՎԱԾ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐՆԵՐԻ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՅԻՅԻ
ԳՈՐԾԱԿԻՅՆԵՐԻՑ 421

ԴԱՎԻԴՅԱՆ Ժ.Դ.

ՍԻՆՔՐՈՆ ԵՎ ԱՍԻՆՔՐՈՆ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ՀԱՄԵՄԱՏՈՒԹՅՈՒՆ ԸՍՏ
ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ՓՈՔՐ ՀԷԿ-ԵՐԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ 432

ՄԻՄՈՆՅԱՆ Ռ.Հ., ԹԱՂԵՎՈՍՅԱՆ Ա.Պ., ՂՈՒԼՅԱՆ Ա.Գ. ՌԱԴԻՈՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՍԱՐՔԱՎՈՐՈՒՄ ՄԱԶԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՉԱՓՄԱՆ ՀԱՄԱՐ	439
ՏՐԱՎԱԶՅԱՆ Գ.Մ. ՀԵՏԱԴԱՐՁ ԿԱՊԻ ՇՂԹԱՅԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱՐՀԵՍՏԱԿԱՆ ԻՆԴՈՒԿՏԻՎՈՒԹՅԱՆ ՄԵԾՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ	444
ՄԻՄՈՆՅԱՆ Ս.Հ., ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Ա.Գ., ՄԻՄՈՆՅԱՆ Ա.Ս. ՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ԸՆԴՀԱՆՐԱՅՎԱԾ ՀԱԿԱԴԱՐՁ ՄԱՏՐԻՑՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴ [I]	452
ՍԱՀԱԿՅԱՆ Ս.Ա., ԴԱՐԱՆՉՅԱՆ Մ.Կ., ՍԱՀԱԿՅԱՆ Ա.Ս. ՕՊՏԻՄԱԼ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՎԱՐԻԱՅԻՈՆ ՀԱՇՎԻ ԽՆԴԻՐՆԵՐՈՒՄ ՖՈՒՆԿՑԻՈՆԱԼԻ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ԱՐԳՈՒՄԵՆՏԻ ԵԶՐԱՅԻՆ ԱՐԺԵՔԻ ՇԵՂՈՒՄՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ	464
ԱՇՉԻՅԱՆՅ Է.Պ. ՀԻԴՐԱՎԼԻԿԱԿԱՆ ԲԱԲԱՆԻ ՆԵՐՄՂՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿԱՄԻՋՈՑԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ	471
ԴԱՍՏԱԿՅԱՆ Է.Ա., ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ Ռ.Ս., ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ Դ.Ռ., ՄԵԼԻՔՉԱՆՅԱՆ Ա.Ս. ՄԻԱԶԱՓ ՁԱՅՆԱՅԻՆ ԱԼԻՔԻ ԱԿՏԻՎ ԿՈՄՊԵՆՍԱՑՈՒՄԸ ՇԱՐԺՎՈՂ ՕԴԱՅԻՆ ՄԻՋԱՎԱՅՐՈՒՄ	480

СОДЕРЖАНИЕ

<i>МАРУХЯН В.З.</i>	
ПРОДОЛЖАЕМ ИДТИ УВЕРЕННОЙ ПОСТУПЬЮ	351
<i>ДРАЧЕВ О.И., ТАРАНЕНКО Г.В., ТАРАНЕНКО В.А., СВИЦЬ А.</i>	
ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВИБРАЦИОННОГО СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ	359
<i>АРЗУМАНЯН А.М.</i>	
К МЕТОДУ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В РЕЖУЩЕЙ ПЛАСТИНЕ И ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ	371
<i>АБРАМЯН В.К., ДАВТЯН С.П., ЕНГИБАРЯН С.Н.</i>	
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ИНИЦИИРОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ВЗРЫВА	377
<i>МАРТИРОСЯН В.А., АКОПЯН Н.Н., АЙВАЗЯН А.А., САСУНЦЯН М.Э.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ХРОМИТОВЫХ РУД ТАПАСАРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ	383
<i>ПЕТРОСЯН А.С., ТУМАНЯН Г.А., ГУКАСЯН В.С.</i>	
ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АНТИФРИКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ Fe-Cr. СВОЙСТВА И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ	393
<i>ТАДЕВОСЯН А.В., АМБАРЦУМЯН А.Ф., СУКИАСЯН А.Р., КИРАКОСЯН А.А., ШАМИАН А.Г.</i>	
ЭКСПРЕСС-МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ	402
<i>САРГСЯН Л.Е., АГАЯН А.А.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОРАФИНИРОВАНИЯ МЕСТНОГО ПЕРВИЧНОГО СВИНЦА	407
<i>ОГАНЕСЯН А.Г., ЗАКАРЯН А.М., АЛАВЕРДЯН А.А.</i>	
ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ С НИСХОДЯЩИМИ СЛОЯМИ И ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКОЙ	412
<i>ХАЧАТРЯН В.С., БАДАЛЯН Н.П., ХАЧАТРЯН К.В., ГРИГОРЯН С.Э.</i>	
ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИИ ПОТЕРЬ МОЩНОСТЕЙ, ЗАВИСЯЩИХ ОТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ	421
<i>ДАВИДЯН Ж.Д.</i>	
СОПОСТАВЛЕНИЕ СИНХРОННОГО И АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРОВ ПО УРОВНЮ ПОТЕРЬ В УСЛОВИЯХ МАЛЫХ ГЭС	432

<i>СИМОНЯН Р.А., ТАДЕВОСЯН А. П., ГУЛЯН А.Г.</i>	
РАДИОФИЗИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОС	439
<i>ТРАВАДЖЯН Г.М.</i>	
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА ВЕЛИЧИНУ ИСКУССТВЕННОЙ ИНДУКТИВНОСТИ	444
<i>СИМОНЯН С.О., АВЕТИСЯН А.Г., СИМОНЯН А.С.</i>	
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОБОБЩЕННЫХ ОБРАТНЫХ МАТРИЦ [1]	452
<i>СААКЯН С.А., ДАРАХЧЯН М.К., СААКЯН А.С.</i>	
ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛА В ЗАДАЧАХ ВАРИАЦИОННОГО ИСЧИСЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ОТКЛОНЕНИЯХ ГРАНИЧНОГО ЗНАЧЕНИЯ АРГУМЕНТА	464
<i>АЩИЯНЦ Э.П.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИОДА НАГНЕТАНИЯ ГИДРОТАРАНА	471
<i>ДАСТАКЯН Э.А., ОВСЕПЯН Р.С., ОВСЕПЯН Д.Р., МЕЛИҚДЖАНИЯН А.М.</i>	
АКТИВНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ОДНОМЕРНОЙ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В ДВИЖУЩЕЙСЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ	480

CONTENTS

MARUKHYAN V.Z.	
RESOLUTE STEPS ARE IN PROGRESS	351
DRACHOV O.I., TARANENKO G.V., TARANENKO W.A., SWIC A.	
SUBSTANTIATION OF DYNAMIC SYSTEM PARAMETERS CHOICE OF APERTURE VIBRATING DRILLING	359
ARZUMANYAN A.M.	
THE METHOD OF APPROACH OF TEMPERATURE FIELD CALCULATION IN CUTTING PLATE AND DETAIL TO BE ELABORATED	371
ABRAMYAN V.K., DAVTYAN S.P., YENGIBARYAN S.N.	
ELECTRODYNAMIC MECHANISM OF INITIATION «REOLOGICAL EXPLOSION»	377
MARTIROSYAN V.H., HAKOBYAN N.N., AIVAZYAN A.A., SASUNTSYAN M.E.	
INVESTIGATION OF CHROMITE ORE REACTIVITY IN TAPASAR DEPOSIT.....	383
PETROSYAN H.S., TUMANYAN G.A., GHUKASYAN V.S.	
OBTAINING OF POWDER COMPOSITE MATERIAL TECHNOLOGY WITH ANTIFRICTION PURPOSE BASED ON Fe-Cr PROPERTIES AND STRUCTURAL FORMING	393
TADEVOSYAN A.V., HAMBARTSUMYAN A.F., SUKIASYAN A.R., KIRAKOSYAN A.A., SHAMIYAN A.G.	
EXPRESS-METHOD OF HEAVY METAL DIAGNOSTICS	402
SARGSYAN L.Ye., AGHAYAN A.A.	
INVESTIGATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETRES OF DOMESTIC NATURAL LEAD	407
HOVHANNISYAN A.H., ZAKARYAN A.M., ALAVERDYAN H.H.	
SUBSTANTIATION EFFICIENCY AND STABILITY OF THE CONSTRUCTIVE ELEMENTS OF MINING METHOD WITH DESCENDING LAYERS AND HARDENING BACKFILL	412
KHACHATRYAN V.S., BADALYAN N.P., KHACHATRYAN K.V., GRIGORYAN S.E.	
POWER LOSS FUNCTION CONSTRUCTION DEPENDING ON TRANSFORMER TRANSFORMATION COEFFICIENTS	421
DAVIDYAN J.D.	
COMPARISON OF SYNCHRONOUS AND ASYNCHRONOUS GENERATORS ON THE LEVEL OF LOSSES IN CONDITIONS OF SMALL HYDROELECTRIC POWER PLANTS	432

SIMONYAN R.H., TATEVOSYAN A. P., GHULYAN A. G.	
RADIOPHYSICAL DEVICE FOR HAIR PARAMETERS MEASUREMENT	439
TRAVAJYAN G.M.	
INFLUENCE OF PARAMETERS OF THE FEEDBACK CIRCUIT ON ARTIFICIAL INDUCTANCE	444
SIMONYAN S.H., AVETISSYAN A.G., SIMONYAN A.S.	
METHOD OF DETERMINATION OF PARAMETRIC GENERALIZED INVERSE MATRICES (I)	452
SAHAKYAN S.A., DARAKHCHYAN M.K., SAHAKYAN A.S.	
FUNCTIONAL DEVIATION ESTIMATION IN OPTIMAL CONTROL VARIATION CALCULUS TASKS UNDER DEVIATION OF BOUNDARY VALUE ARGUMENT	464
ASHCHYANTS ED. P.	
THE HYDROTARAN PERIOD OF FORCING INVESTIGATION	471
DASTAKYAN E.A., HOVSEPYAN R.S., HOVSEPYAN D.R., MELIQJANYAN A.M.	
ACTIVE CONTROL OF ONE-DIMENSIONAL SOUND WAVE IN MOVING ENVIRONMENT	480