

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. ԱԴԲԱԼՅԱՆ, Ռ.Վ. ԱՏՈՅԱՆ,
Վ.Վ. ԲՈՒՆԻԱՏՅԱՆ, Ա.Խ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ժ.Դ. ԴԱՎԻԴՅԱՆ, Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ,
Ս.Ս. ՂԱԶԱՐՅԱՆ, Ռ.Զ. ՄԱՐԴԻՆՅԱՆ, ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ,
Վ.Ս. ՍԱՖԱՐՅԱՆ, Ս.Հ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Ա.Թ. ՔՈՒՉՈՒԿՅԱՆ

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, А.Х. ГРИГОРЯН, Ж.Д. ДАВИДЯН, С.П. ДАВТЯН, С.М. КАЗАРЯН,
А.Т. КУЧУКЯН, В.З. МАРУХЯН, Ю.Л. САРКИСЯН, В.С. САРКИСЯН,
В.С. САФАРЯН, С.О. СИМОНЯН, М.Г. СТАКЯН

EDITORIAL BOARD

R.M. MARTIROSSYAN (editor-in-chief), H.A. TERZYAN (vice-editor-in-chief),
Z.K. STEPANYAN (executive secretary), S.G. AGHBALYAN,
R.V. ATOYAN, V.V. BUNIATYAN, Zh.D. DAVIDYAN,
S.P. DAVTYAN, S.M. GHAZARYAN, A.Kh. GRIGORYAN, A.T. KUCHUKYAN,
V.Z. MARUKHYAN, YU.L. SARGSYAN, V.S. SARKISSYAN, V.A. SAFARYAN,
S.H. SIMONYAN, M.G. STAKYAN

Հրատ. խմբագիր՝

Ժ.Ս. ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Խմբագիրներ՝

Հ.Ց. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

Գ.Լ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Մ.Գ. ԱՐԶՈՒՄՅԱՆՅԱՆ, Հ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ԳԼԱՆԱԿԱՆ ՄԱՍԼԱՄԱՅՐՈՒՄ ՓՈՇԵՆՑՈՒԹԻ ԽՏԱՅՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ
ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՈՐՈՇ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Փոշենյութի խտացման գործընթացի բնութագրերի օգտագործմամբ կատարվել է գլանական մամլամայրում, մամլման տեխնոլոգիական պարամետրերի որոշում: Մոր-Կուլոնի և Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանների հիման վրա հետազոտվել է գլանական մամլամայրում փոշենյութի մամլման լարվածային վիճակը հպակային շփման առկայության ու ներքին շփման անկյան տարբեր արժեքների դեպքերում: Թվային հաշվարկները կատարվել են Mathcad ծրագրային միջավայրում, որոշվել են առանցքային և կողմնային ճնշումների մեծությունները գլանական նախապատրաստվածքի բարձրության տարբեր կետերում, և ստացված արդյունքները համեմատվել են:

Առանցքային բառեր. փոշենյութ, Մոր-Կուլոնի և Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմաններ, լարվածային վիճակ, կոշտ գլանական մամլամայր, հատիկների կառչման գործակից, ներքին շփման անկյուն:

Արդյունաբերության տարբեր բնագավառներում մեծ կիրառություն ունեն փոշենյութերից պատրաստված մեքենամասերը, որոնք ստացվում են տարբեր մամլակաղապարներում մետաղափոշիների սառը մամլմամբ և այնուհետև մամլված բրիկետների եռակլամբ: Բարձրորակ արտադրանք ստանալու համար շատ կարևոր է կատարել տվյալ նյութից փոշու ընտրություն, ահրաժեշտ քանակի և ծավալի հաշվարկ, որոշել մամլման ուժի մեծությունն ու կողային ճնշումը, ինչպես նաև դրանց փոփոխման օրինաչափությունները և այլն: Ընդ որում, այդ տեխնոլոգիական պարամետրերի որոշումը կատարվում է փոշենյութերի խտացման գործընթացի ծավալային՝ փոշենյութի հարաբերական խտության (θ), ընթացիկ ծակոտկենության (v), ազատ լցովի և ցնցանստելի վիճակների խտությունների (γ_{lg}) և (γ_{ga}), ինչպես նաև փոշեհատիկների միջև կապի՝ ներքին շփման անկյան (ρ) և դրա հատիկների կառչման գործակիցի (k) բնութագրերի օգտագործմամբ:

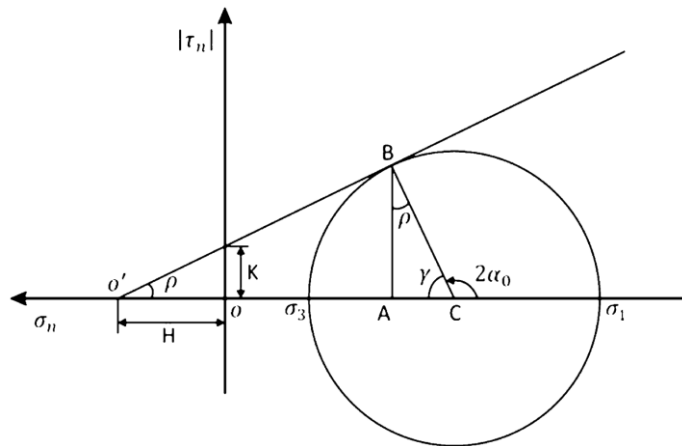
Փոշենյութերի խտացման գործընթացի ծավալային բնութագրերի մասին հետազոտությունների հիմքում դրված են ինչպես Բալշինի կողմից կատարված, այնպես էլ նրա կողմից վերլուծված գրականության մեջ հայտնի բազմաթիվ փորձարարական աշխատանքները [1,2]:

Փոշեհատիկների միջև կապի բնութագրերի վերաբերյալ հետազոտություններից ուշադրության արժանի են Պերելմանի կողմից կատարված փորձարարական և տեսական աշխատանքները [3]: Ընդ որում, փորձարարական հետազոտությունների

կատարման համար նախագծվել և պատրաստվել է հատուկ հարմարանք, իսկ տեսական հետազոտություններն իրականացվել են Մոր-Կուլոնի պլաստիկության պայմանի հիման վրա, որը ուղիղ գծային կապ է հաստատում τ_n շոշափող լարման և σ_n նորմալ լարման բաղադրիչների միջև (նկ.1) [3,4].

$$|\tau_n| = \sigma_n \operatorname{tg} \rho + k, \quad (1)$$

որտեղ σ_n և τ_n - ն դիտարկվող հարթակում լարման համապատասխանաբար նորմալ և շոշափող բաղադրիչներն են:



Նկ.1. Մոր-Կուլոնի պլաստիկության պայմանը պատկերող գրաֆիկը

σ_1 և σ_3 գլխավոր լարումներով արտահայտված (1) պլաստիկության պայմանը [5]-ում բերվում է գործնական կիրառության համար ավելի հարմար տեսքի.

$$|\sigma_3 - \sigma_1| = (\sigma_3 + \sigma_1 + 2H) \sin \rho: \quad (2)$$

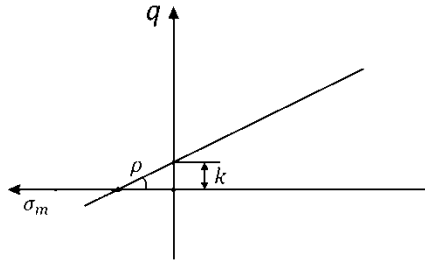
Նշենք նաև, որ ներկայումս փոշիների մամլման գործընթացների հետազոտման համար օգտագործվում է նաև Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանը, որը ուղիղ գծային կապ է հաստատում քառակուսի աստիճանի արմատ լարման դեվյատորի երկրորդ ինվարիանտի (q) և միջին լարման (σ_m) միջև (նկ.2) [5,6].

$$q \cos \rho - \sigma_m \sin \rho = k \cos \rho, \quad (3)$$

որտեղ q - ն և σ_m - ը գլխավոր σ_1 , σ_2 և σ_3 լարումներով արտահայտված ունեն հետևյալ տեսքը՝

$$q = \sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (4)$$

$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3: \quad (5)$$



Նկ.2. Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանը պատկերող գրաֆիկը

[5]-ում մետաղական փոշենյութերից նմուշների բեռնավորման համասեռ դեֆորմացիոն վիճակների հետազոտման համար (միառանցք սեղմում, մաքուր սահք և մաքուր սահքի ու հիդրոստատիկ ճնշման համատեղ ազդեցություն) Մոր-Կուլոնի և Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանների հիման վրա լուծվել են օրինակներ, և կատարվել է ստացված տվյալների համեմատում, ինչը ցույց է տվել, որ Մոր-Կուլոնի և Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանների օգտագործմամբ ստացված տվյալների միջև առավելագույն տարբերությունը կազմում է 13%:

Ինչ վերաբերում է անհամասեռ դեֆորմացման տեխնոլոգիական խնդիրների լուծմանը, ապա դրանք բավականին բարդ են և քիչ հետազոտված [7,8]:

Աշխատանքի նպատակն է խտացման գործընթացի բնութագրերի օգտագործմամբ տեխնոլոգիական պարամետրերի որոշումը և Մոր-Կուլոնի ու Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանների հիման վրա գլանական մամլամայրում հպակային շփման առկայության և ներքին շփման անկյան տարբեր արժեքների դեպքերում փոշենյութի մամլման լարվածային վիճակի հետազոտումը:

Փոշենյութի դեֆորմացման ընթացիկ պահին դրա խտության կամ ծակոտկենության որոշման համար օգտագործենք զանգվածի պահպանման օրենքը [9]՝

$$\frac{d\theta}{\theta} = -3d\varepsilon_0, \quad (6)$$

որտեղ $d\varepsilon_0$ - ն միջին դեֆորմացման աճն է:

Հաշվի առնենք նաև փոշենյութի v ընթացիկ ծակոտկենության և θ հարաբերական խտության միջև հետևյալ բանաձևը [9]՝

$$\theta = 1 - v, \quad (7)$$

ինչը հնարավորություն է տալիս (6) - ը ներկայացնել հետևյալ տեսքով՝

$$\frac{d(1-v)}{1-v} = -3d\varepsilon_0:$$

Ինտեգրելով այդ դիֆերենցիալ հավասարումը, կստանանք՝

$$\ln(1 - v) = -3\varepsilon_0 + C, \quad (8)$$

որտեղ C - ն ինտեգրման հաստատունն է, իսկ ε_0 - ն՝ $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ գլխավոր դեֆորմացումներով արտահայտված և հետևյալ բանաձևով որոշվող միջին դեֆորմացումը՝

$$\varepsilon_0 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)/3: \quad (9)$$

Հաշվենք փոշենյութի v ընթացիկ ծակոտկենության մեծությունը ազատ լցովի վիճակից ցնցանստելի վիճակի անցնելու դեպքում [2]: Դրա համար օգտագործենք հետևյալ սկզբնական պայմանը.

$$\text{երբ } \varepsilon_0 = 0, v = v_0, \quad (10)$$

որտեղ v_0 -ն լցովի վիճակի ծակոտկենությունն է և θ_0 , հարաբերական լցովի խտությունով արտահայտված, որոշվում է (7) բանաձևով՝

$$v_0 = 1 - \theta_0: \quad (11)$$

(11) - ը տեղադրելով (8)-ի մեջ, ստանում ենք ինտեգրման C հաստատունը, իսկ այնուհետև՝ փոշենյութի v ընթացիկ ծակոտկենությունը.

$$C = \ln(1 - v_0), \ln(1 - v) = -3\varepsilon_0 + \ln(1 - v_0),$$

$$v = 1 - (1 - v_0)\exp(-3\varepsilon_0): \quad (12)$$

Տալով ε_0 -ին տարբեր արժեքներ, (12) - ով կորոշենք ցնցանստելու տվյալ դեպքի ընթացիկ ծակոտկենությունը, իսկ (7) - ով՝ հարաբերական ցնցանստելի խտությունը:

Նշենք նաև, որ ունենալով ցնցանստեցման ծակոտկենության վերջնական արժեքը՝ v_{gl} , (12) - ով կարելի է որոշել միջին դեֆորմացմանը համապատասխան ε_{0gl} մեծությունը և լուծել տեխնոլոգիական խնդիրներ:

Մասնավոր դեպքում էլեկտրոլիտային պողպատի փոշու ծավալային $\gamma_{lg} = 2,7q/um^3$, $\theta_{lg} = \theta_0 = 0,343$ [2], $\gamma_{gl} = 4,34q/um^3$ և $\theta_{gl} = 0,558$ բնութագրերով և օգտագործելով վերը նշված բանաձևերը, կատարենք հետևյալ հաշվարկները.

1. Փոշենյութի ծակոտկենության և միջին դեֆորմացումը:

Նախ որոշենք՝

$$v_0 = 1 - \theta_0 = 0,657, v_{gl} = 1 - \theta_{gl} = 0,442$$

և ըստ (12)-ի կստանանք՝

$$v_{gl} = 1 - (1 - v_0)\exp(-3\varepsilon_0), 0,442 = 1 - (1 - 0,657)\exp(-3\varepsilon_0),$$

ինչը հնարավորություն է տալիս որոշել միջին դեֆորմացումը.

$$0,343 \exp(-3\varepsilon_0) = 0,558, \exp(-3\varepsilon_0) = 1,627,$$

$$-3\varepsilon_0 = \ln 1,627, -3\varepsilon_0 = 0,487, \varepsilon_0 = -0,162:$$

2. Գլանական մամլամայրի չափերի որոշումը:

Եթե ցնցանստեցումը կատարվում է գլանական մամլամայրում $d = 40 \text{ մմ}$ տրամագծով, և վերջինս լցվում է $H_0 = 80 \text{ մմ}$ բարձրությամբ, ապա $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$ -ի

դեպքում (9)-ից կստանանք $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\text{un}}/3$, $\varepsilon_{\text{un}} = 3\varepsilon_0 = -0,486$: Մյուս կողմից, քանի որ դա մեծ դոֆորմացում է, ապա օգտագործելով իրական (լոգարիթմական) դոֆորմացումները՝ կստանանք $\varepsilon_{\text{un}} = \ln(H/H_0) = -0,48$, $H/H_0 = e^{-0.486} = 1/e^{0.486} = 1/1,626 = 0,615$, $H = 0,615 \cdot H_0 = 0,615 \cdot 80 = 49,2$ մմ: Այսինքն՝ ցնցանաստեցման $\theta_{g\dot{u}} = 0,558$ հարաբերական խտության դեպքում փոշենյութի բարձրությունը կդառնա՝ $H = 49,2$ մմ:

3. Տվյալ մամլամայրում լցվող պողպատի փոշու կշիռի որոշումը:

Երբ $\gamma_{lg} = \frac{2,7q}{\pi d^2}$, $d = 40$ մմ և $H_0 = 80$ մմ: Կստանանք $G_{lg} = \gamma_{lg} \cdot V_{lg} = 2,7 \times \times H_0 \pi d^2 / 4 = 271,3q$: Իսկ եթե հաշվարկները կատարենք ցնցանաստեցման կշռով՝ $\gamma_{g\dot{u}} = 4,34q/\pi d^2$ և համապատասխան բարձրությամբ՝ $H = 49,2$ մմ, ապա կստանանք $G_{lg} = \gamma_{g\dot{u}} \cdot V_{g\dot{u}} = 4,34 \cdot H \pi d^2 / 4 = 268,2q$:

Ինչ վերաբերում է գլանային մամլամայրում հպակային շփման հաշվառման դեպքում փոշենյութի ցնցանաստեցմից հետո մամլման ուժի մեծության ու կողային ճնշման որոշմանը, ապա դրա համար օգտագործում են Մոր-Կուլոնի և Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանները [3-6]:

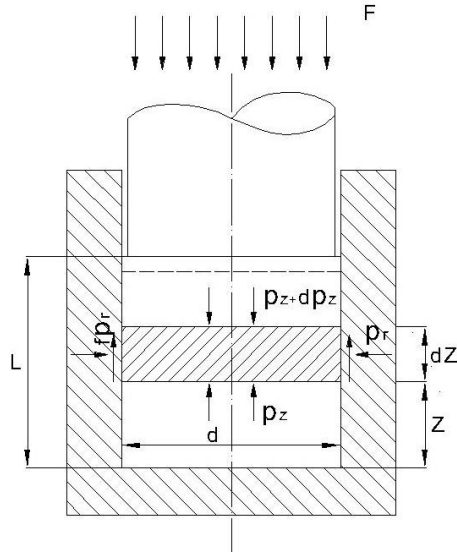
[7] - ում ուսումնասիրվել է գործնականում մեծ կիրառություն ունեցող կոշտ գլանական մամլամայրում չեռակալված փոշուց նմուշի խտացման գործընթացը Մոր-Կուլոնի պլաստիկության պայմանի հիման վրա, ինչը հնարավորություն է տվել կապ հաստատել առանցքային և կողային ճնշումների միջև:

[8] - ում կոշտ գլանական մամլամայրում չեռակալված մետաղական փոշենմուշի մամլման գործընթացի լարվածային վիճակի հետազոտման համար օգտագործվել է Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանը, ինչը հնարավորություն է տվել կապ հաստատել առանցքային և կողային ճնշումների միջև: Փոշու հատիկների միջև ներքին շփման անկյան և կառչման գործակցի որոշակի արժեքների դեպքում առանցքային և կողային ճնշումների համար կատարվել են թվային հաշվարկներ, կառուցվել են դրանց գրաֆիկները՝ կախված փոշենմուշի առանցքի կոորդինատից, և ստացված արդյունքները վերլուծվել են:

Կոշտ գլանական մամլամայրում չեռակալված L բարձրությամբ մետաղական փոշենմուշի մամլման գործընթացի (նկ.3) լարվածային վիճակի հետազոտման համար օգտագործվել է դրանից անջատված տարրի հավասարակշռության հավասարումը [7].

$$d \cdot dp_z = 4f p_r dz, \quad (13)$$

որտեղ d - ն փոշենմուշի տրամագիծն է, f - ը՝ մամլամայրի պատի և նմուշի միջև շփման գործակիցը, dz - ը՝ տարրի բարձրությունը, dp_z և p_r - ը՝ համապատասխանաբար նմուշի տարրի վրա ազդող առանցքային և կողային ճնշումները:



Նկ.3. Լարվածային վիճակի սխեման մամլամայրի պատի և նմուշի միջև շփման առկայության դեպքում

Գնահատելով տարրի լարվածային վիճակը և օգտագործելով Մոր-Կուլոնի պլաստիկության պայմանը՝ p_r կողային ճնշման համար ստացվել է հետևյալ բանաձևը [7]՝

$$p_r = \frac{p_z(1+\sin \rho) - 2H \sin \rho}{1 - \sin \rho} \quad (14)$$

(14) - ը տեղադրելով (13) - ի մեջ, կատարելով հետևյալ չափում չունեցող նշանակումները՝ $p_z/k = \bar{p}_z$, $dp_z/k = d\bar{p}_z$, $p_r/k = \bar{p}_r$, $dz/d = d\bar{z}$, ընտրելով $L/d = 1.2$ և լուծելով ստացված հավասարումը, $\bar{p}_z$ ու $\bar{p}_r$ - ի համար ստացվել են հետևյալ բանաձևերը.

$$\bar{p}_z = \frac{(a+b\bar{p}_0)e^{b(\bar{z}-1,2)} - a}{b}, \bar{p}_r = \frac{p_r}{k} = \frac{(a+b\bar{p}_0)e^{b(\bar{z}-1,2)}}{4f} \quad (15)$$

որտեղ՝ $a = -\frac{8f \cos \rho}{1 - \sin \rho}$, իսկ $b = \frac{4f(1+\sin \rho)}{1 - \sin \rho}$:

Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանով կոշտ գլանական մամլամայրում չեռակաված L բարձրությամբ մետաղական փոշենմուշի մամլման գործընթացի ուսումնասիրման համար (նկ.3) օգտագործվել է դրանից անջատված տարրի հավասարակշռության հավասարումը: Գնահատելով տարրի լարվածային վիճակը՝ Դրուկեր-Պրագերի (3) պլաստիկության պայմանի հիման վրա p_r կողային ճնշման համար ստացվել է հետևյալ բանաձևը [8]՝

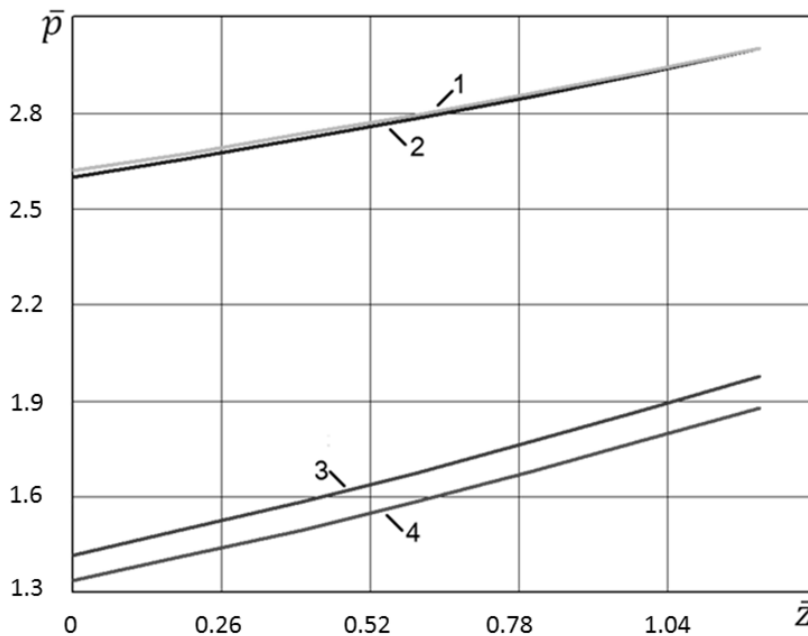
$$p_r = \frac{3k \cos \rho - p_z(\sqrt{3} \cos \rho + \sin \rho)}{2 \sin \rho - \sqrt{3} \cos \rho} \quad (16)$$

(16) - ը տեղադրելով (13) - ի մեջ և նույն նշանակումներով լուծելով ստացված հավասարումը, $\bar{p}_z$ և $\bar{p}_r$ -ի համար ստացվել են հետևյալ բանաձևերը.

$$\bar{p}_z = \frac{(a+b\bar{p}_0)e^{b(\bar{z}-1.2)}-a}{b}, \bar{p}_r = \frac{(a+b\bar{p}_0)e^{b(\bar{z}-1.2)}}{4f}, \quad (17)$$

որտեղ $a = \frac{12f \cos \rho}{2 \sin \rho - \sqrt{3} \cos \rho}$, իսկ $b = -\frac{4f(\sqrt{3} \cos \rho + \sin \rho)}{2 \sin \rho - \sqrt{3} \cos \rho}$:

Կոշտ գլանական մամլամայրում չեռակալված մետաղական փոշենմուշի մամլման դեպքում Մոր-Կուլոնի և Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանների համեմատության համար ընտրվել է $k = 60 \text{ ՄՊա}$, $\rho = 10^\circ$, $f = 0,05$, և կառուցվել են $\bar{p}_z$ ու $\bar{p}_r$ -ի գրաֆիկները՝ կախված $\bar{z}$ -ից (նկ.4): Նշենք, որ խնդրի թվային հաշվարկները կատարվել են $\bar{p}_z = \bar{p}_0 = 3$ դեպքի համար:



Նկ.4. $\bar{p}_z$ -ի և $\bar{p}_r$ -ի գրաֆիկները՝ կախված $\bar{z}$ -ից

Նկ.4-ում 1 և 4-ը, ըստ Մոր-Կուլոնի պլաստիկության պայմանի, համապատասխանաբար $\bar{p}_z$ ու $\bar{p}_r$ -ի գրաֆիկներն են, իսկ 2 և 3-ը՝ ըստ Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանի:

Ստացված գրաֆիկների հիման վրա կազմվել է աղ. 1-ը, որտեղ բերված է նաև տարբեր պլաստիկության պայմաններով ստացված $\bar{p}_z$ ու $\bar{p}_r$ -ների համեմատությունը տոկոսով:

Մոր-Գուլոնի և Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմաններով ստացված $\bar{p}_z$ ու $\bar{p}_r$ -ի թվային արժեքները, երբ $k = 60$ ՄՊա և $\rho = 10^0$

$\bar{z}$		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2
Ըստ Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանի	$\bar{p}_z, \text{ ՄՊա}$	2,597	2,655	2,716	2,782	2,85	2,923	3
	$\bar{p}_r, \text{ ՄՊա}$	1,417	1,498	1,583	1,673	1,769	1,869	1,976
Ըստ Մոր-Գուլոնի պլաստիկության պայմանի	$\bar{p}_z, \text{ ՄՊա}$	2,618	2,673	2,731	2,793	2,858	2,927	3
	$\bar{p}_r, \text{ ՄՊա}$	1,335	1,413	1,496	1,583	1,376	1,774	1,877
$\bar{p}_z$ -ի տարբերությունը, %		0,8	0,67	0,55	0,39	0,28	0,14	0
$\bar{p}_r$ -ի տարբերությունը, %		5,78	5,67	5,5	5,38	5,26	5,08	5,01

Աղ. 1-ի տվյալները ցույց են տալիս, որ մամլամատի տակ նախապատրաստվածքի $\bar{p}_z$ ու $\bar{p}_r$ - ի արժեքները ամենամեծն են՝ դրա այլ հատույթների տվյալների համեմատ: Այսինքն՝ մամլամատի տակ նյութի խտությունը ավելի մեծ է, ինչը համընկնում է [1] - ի տվյալներին:

Անհամասեռ դեֆորմացման տեխնոլոգիական խնդրի հետազոտման համար Մոր-Գուլոնի և Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմաններով որոշվել են $c = \bar{p}_r/\bar{p}_z$ կոդային ճնշման գործակցի արժեքները տարբեր ρ ներքին շփման անկյան դեպքում նմուշի ներքևի մասի համար: Ստացված տվյալները բերված են աղ. 2-ում և 3-ում:

Ըստ Մոր-Գուլոնի և Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանների c կոդային ճնշման գործակցի արժեքները տարբեր ρ ներքին շփման անկյան դեպքում

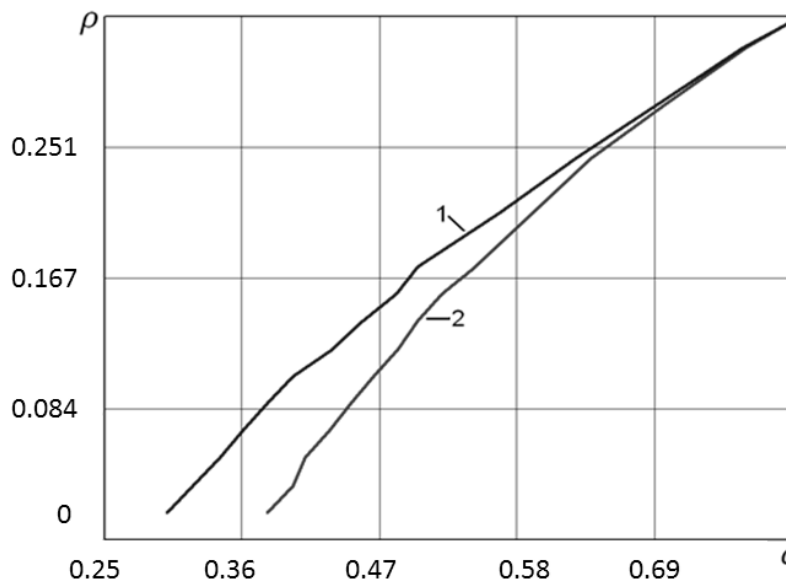
ρ	1 ⁰	2 ⁰	3 ⁰	4 ⁰	5 ⁰	6 ⁰	7 ⁰	8 ⁰
c -արժեքները՝ ըստ Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանի	0,3	0,32	0,342	0,36	0,38	0,4	0,432	0,457
c -արժեքները՝ ըստ Մոր-Գուլոնի պլաստիկության պայմանի	0,38	0,4	0,41	0,43	0,447	0,465	0,484	0,5

Ըստ Մոր-Գուլոնի և Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանների c կոդային ճնշման գործակցի արժեքները տարբեր ρ ներքին շփման անկյան դեպքում

ρ	9 ⁰	10 ⁰	12 ⁰	14 ⁰	16 ⁰	18 ⁰	19 ⁰
c -արժեքները՝ ըստ Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանի	0,483	0,5	0,566	0,627	0,693	0,76	0,8
c -արժեքները՝ ըստ Մոր-Գուլոնի պլաստիկության պայմանի	0,52	0,56	0,592	0,64	0,699	0,762	0,8

Աղ. 2 և 3 - ում բերված c կողային ճնշման գործակցի $0,3 \leq c \leq 0,8$ տվյալները նույնպես հիմնավորվում են [1] – ում՝ սորուն և հոծ միջավայրի դեֆորմացման մեխանիզմի և օգտագործվող տեսությունների տարբերությամբ:

Աղ. 2-ի և աղ. 3-ի հիման վրա կառուցվել է ρ ներքին շփման անկյան տարբեր արժեքների դեպքում c կողային ճնշման գործակցի միջև կապի գրաֆիկը (նկ. 5): Ընդ որում, 1-ը c -ի գրաֆիկն է ըստ Մոր-Կուլոնի պլաստիկության պայմանի, իսկ 2-ը՝ ըստ Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանի:



Նկ.5. ρ ներքին շփման անկյան տարբեր արժեքների դեպքում $c = \bar{p}_r / \bar{p}_z$ կողային ճնշման գործակցի միջև կապի գրաֆիկը

Այսպիսով, որոշվել են էլեկտրոլիտային փոշու տեխնոլոգիական պարամետրերը խտացման գործընթացի բնութագրի միջոցով, վերլուծվել են Մոր-Կուլոնի և Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանների հիման վրա գլանական մամլամայրում փոշենյութի մամլման լարվածային վիճակի հետազոտության տվյալները հպակային շփման հաշվառման դեպքում, որը հնարավորություն է տվել կատարել անհամասեռ դեֆորմացման տեխնոլոգիական խնդիրների արդյունքների համեմատում: Ցույց է տրվել, որ Մոր-Կուլոնի և Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանների հիման վրա ստացված $\bar{p}_z$ առանցքային ճնշումների միջև առավելագույն տարբերությունը կազմում է 0,8%, իսկ $\bar{p}_r$ կողային ճնշումներինը՝ 5,78%:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Бальшин М.Ю.** Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна.- М.: Металлургия, 1972.-536 с.
2. **Бальшин М.Ю., Кипарисов С.С.** Основы порошковой металлургии.- М.: Металлургия, 1978.-184 с.
3. **Перелман В.Е.** Формование порошковых материалов.- М.: Металлургия, 1979.-232 с.
4. **Соколовский В.В.** Статика сыпучей среды.-М.: Гос.изд. физ.-мат. литературы, 1960.-243с.
5. **Պետրոսյան Գ.Լ., Արզումանյան Մ.Գ.** Չեռակաված փոշենյութերի Մոր-Կուլոնի և Դրուկեր-Պրագերի պլաստիկության պայմանների օգտագործման առանձնահատկությունները // ՀՊՃՀ (Պոլիտեխնիկ) Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու. Մաս 2. - Երևան, 2014.- էջ 326-333:
6. **Petrosyan G.L., Kraft T.** Application of plasticity theory for simulating compaction of metal powder. Report 2. Equations of plasticity theory of a constitutive model for metal powder// Proceedings of Engineering Academy of Armenia.- 2005.- Vol. 2, N4.- P. 538-543.
7. **Петросян Г.Л., Арзуманян М.Г., Сафарян М.Б., Кесоян Г.** Особенности исследования процессов пластического деформирования неспеченных порошковых материалов // Вестник НПУА. Сер. “Металлургия, материаловедение, недропользование”. - 2015.- Вып. 18, No1.- С. 57 – 67.
8. **Արզումանյան Մ.Գ.** Կոշտ գլանական մամլամայրում չեռակաված փոշենմուշի մամլման գործընթացի լարվածային վիճակի հետազոտումը // ՀԱՊՀ Լրաբեր գիտական հոդվածների ժողովածու. Մաս 2.- Երևան, 2015.- էջ 319-325:
9. **Петросян Г.Л.** Пластическое деформирование порошковых материалов.-М.: Металлургия, 1988.-153 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 11.02.2015:

Գ.Լ. ПЕТРОСЯН, М.Г. АРЗУМАНЯН, А.Г. ПЕТРОСЯН О НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРАХ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ

Определены технологические параметры прессования порошка в цилиндрической матрице с помощью характеристик процесса прессования порошка. При разных значениях угла внутреннего трения порошка по условиям пластичности Мора-Кулона и Друкера-Прагера исследовано напряженное состояние прессования порошка в цилиндрической матрице при наличии контактного трения. Осуществлены численные расчеты в программной среде Mathcad, определены величины осевого и бокового давлений в разных точках высоты цилиндрической заготовки. Проведено сравнение полученных результатов.

Ключевые слова: порошок, условия пластичности Мора-Кулона и Друкера-Прагера, жесткая цилиндрическая матрица, коэффициент сцепления частиц, угол внутреннего трения.

G.L. PETROSYAN , M.G. ARZUMANYAN, H.G. PETROSYAN

**ON SOME PARAMETERS OF POWDER COMPACTION PROCESS CALCULATION
IN A CYLINDRICAL DIE**

The technological parameters of powder compaction in a cylindrical die are determined using the characteristics of the powder compaction process. At different values of the angle of the powder internal friction, the stress state of its compaction in a cylindrical die is studied by Mohr-Coulomb and Druker-Prager plasticity conditions in the presence of the contact friction. Numerical calculations are carried out in the software environment Mathcad. The values of axial and lateral pressures are determined in different points of height of cylindrical billets, and the obtained results are compared.

Keywords: powder, Mohr-Coulomb and Druker-Prager plasticity conditions, hard cylindrical die, factor of the granule cohesion, internal friction angle.

Ջ.Ա. ԱՄՍՏՐՅԱՆ, Ս.Ս. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

ԿԱՆՈՆԱՎՈՐ ՁԵՎԻ ՈՐՄՆԱՔԱՐԵՐԻ ԱՆՄՆԱՅՈՐԴ ՀԱՆՈՒՅԹԻ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱ
ԵՎ ԱՆՎԱՎՈՐ ՄԵՔԵՆԱ

Ներկայացված է որմնաքարերի հանույթի տեխնոլոգիան՝ հատուկ քարհան անվավոր մեքենայով, պատրաստված ավտոբեռնիչի հիման վրա, որը բացառում է հանքահրապարակում մնացորդային աստիճանների առաջացումը: Մեքենայի խուսանավելու ճկունությունը թույլատրում է կրկնակի օգտագործել շահագործումից դուրս եկած քարհանքերը և արմատապես բարելավել հանքամերձ տարածքների բնապահպանությունը:

Առանցքային բառեր. որմնաքար, հանույթ, մեքենա, սկավառակային սղոց, ավտոբեռնիչ, կտրող գլխիկ:

Կանոնավոր ձևի որմնաքարն ինչպես մեր երկրում, այնպես էլ Ղազախստանում և Թուրքմենստանում հիմնական շինանյութերից մեկն է, որի հանույթն իրականացվում է Գյումրու «Քարհատմեքենա» ընկերությունում թողարկվող ռելսավոր քարհան *CMP-026/1* մակնիշի մեքենաներով: Բազմատոննանոց մեքենան ու դրանով հանույթի տեխնոլոգիան փոփոխության չեն ենթարկվել տասնամյակների ընթացքում, որի արդյունքում քարհանույթը բնորոշվում է ցածր արդյունավետությամբ, շրջակա միջավայրին հասցվող անուղղելի վնասներով՝ թափոնների մեծ քանակով ու մնացորդային չօգտագործվող քարհանքերով:

Հիմնախնդրի լուծման համար ՀՀ ԳՊԿ-ն 13-2D106 թեմայով ֆինանսավորեց նոր քարհան մեքենայի նախագծի մշակումը, որի արդյունքում փորձանմուշի պատրաստումից ու փորձարկումից հետո հնարավոր կլինի Գյումրու «Քարհատմեքենա» ընկերությունում կազմակերպել դրա սերիական արտադրությունը: Անվավոր, ճկուն խուսանավոր, անհամեմատ թեթև զանգվածով, հանույթի նոր մեքենաներով հանրապետության քարհանքերի հազեցումը կթույլատրի արմատական բեկում մտցնել կանոնավոր ձևի քարի հանույթի բնագավառում՝ դրա արդյունավետության բարձրացման ուղղությամբ:

Դիտարկումները, արված Արթիկի տուֆի տարբեր քարհանքերում, ցույց են տալիս, որ ներկայումս արդյունահանվում են հիմնականում որմնաքարեր ոչ ավելի $B \times H = 250 \times 200$ մմ լայնական կտրվածքով: Միաժամանակ հաստատվել է, որ արմատականորեն փոխվել է կանոնավոր ձևի պատ շարելու որմնաքարի նշանակությունը: Այն ոչ միայն կրող ֆունկցիա է կատարում, այլև ներկայումս հիմնականում օգտագործվում է դեկորատիվ նպատակներով. ընդ որում՝ ոչ թե դեկորատիվ ներքին երեսապատման, այլ արտաքին: Քարի վրա ամբողջ եզրագծով 30...40 մմ խորությամբ

արվում է ավաստային եզրակտրում, իսկ այնուհետև՝ կտրում եզրամակերևույթներից՝ առաջացնելով «ժայռ» տիպի մակատեսք: Երեսապատման քարը, հակառակ մակերևույթին գայլիկոնված անցքերով, մետաղացանցով լրացուցիչ ամրացվում է շենքի հիմնապատին:

Նոր մեքենայի նախագծի հիմքում ընկած են գյուտերի արտոնագրերով պաշտպանված մշակումներ [1, 2], իսկ աշխատանքները կատարվել են ճարտարագիտական մի քանի համալիր լուծումներով.

- քարի հանույթի ռելսավոր բազմատոննանոց մեքենայի օգտագործման ոչ նպատակահարմարության և ավտոբեռնիչի ամրաշրջանակի բազայով նոր, հանքահրապարակում ճկուն խուսանավելու ունակությամբ հանույթի անվավոր մեքենայի ստեղծման հիմնավորում,

- նոր մեքենայի կտրող գլխիկների օպտիմալ հարմարադասում, սղոցների քանակի ու դասավորվածության որոշում,

- լրացուցիչ հանգույցների, այդ թվում՝ մեքենայի ուղղագիծ տեղաշարժի կառավարման համակարգի, մատուցման լրացուցիչ շարժաբերի նոր կառուցվածքների սկզբունքային սխեմաների մշակումներ,

- մնացորդային աստիճանների բացառման, ինչպես նաև շահագործումից դուրս եկած քարհանքերի կրկնակի օգտագործման նպատակով մեքենայի աշխատանքային գործողությունների նոր տեխնոլոգիայի մշակում,

- ուժային և արտադրողականության հաշվարկներ:

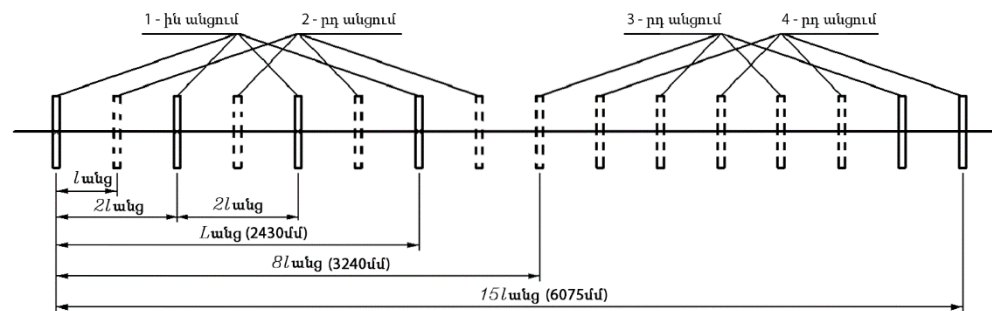
Նախագծային աշխատանքների համար ելակետային պայման է համարվել այն, որ նոր մեքենան հանքահրապարակում չպետք է թողնի աստիճանաձև ելուստներ, որոնք անխուսափելի էին հանույթի ռելսավոր մեքենաների աշխատանքից հետո: Այդ պայմանն ապահովելու համար անհրաժեշտ է, որ նոր մեքենայի կողային կտրող հարթությունների միջև եղած L_u հեռավորությունը լինի ավելի մեծ, քան մեքենայի $B_{մեք}$ լայնությունը:

Նոր մեքենայի համար որպես բազային ընտրվել է առկա 4014 մակնիշի ավտոբեռնիչի ամրաշրջանակը, որն ունի 5000 կգ բեռնամբարձություն և $B_{մեք} = 2350$ մմ լայնություն:

Մեքենայի կտրող գլխիկների ու դրանց վրա տեղակայված սկավառակային սղոցների քանակը որոշելու համար ընդունվել են որմնաքարի ստանդարտ $L = 390$ մմ երկարություն և կտրվածքի 15 մմ լայնություն, երբ օգտագործվում են $b_u = 12$ մմ լայնությամբ սկավառակային սղոցներ: Կտրող գլխիկի վրա գույգ սղոցներ կարելի է տեղադրել $l_u = 390 + 15 = 405$ մմ կամ էլ $2l_u = 810$ մմ միջսղոցային հեռավորությամբ: Միևնույն ժամանակ, L_u հեռավորությունը պետք է բազմապատիկ լինի $l_u = 405$ մմ մեծությանը և ապահովի $L_u > B_{մեք}$ պայմանը, որին կբավարարի $L_u = 6 \times l_u = 2430$ մմ չափը: Ակնհայտ

է, որ կտրող գլխիկների համար նախընտրելի է միջստոցային $2l_u = 810$ մմ հեռավորությունը, քանի որ այս դեպքում գույգ գլխիկների ներսային սղոցների միջև եղած հեռավորությունը նույնպես կլինի $2l_u$:

Նկ. 1-ում ցույց է տրված լայնական կտրման գործողություն կատարելիս մեքենայի հաջորդական երեք անցումների սխեման: 1-ին անցումը կատարելուց հետո մեքենան կատարում է տեղաշարժ l_u չափով՝ կիսելով միջստոցային $2l_u$ երկարությամբ քարերը, իսկ 3-րդ անցումը կատարում է՝ տեղաշարժվելով առաջին ակոսից $8l_u = 3240$ մմ չափով:



Նկ. 1. Մեքենայի տեղաշարժերի սխեման լայնական կտրման գործողության ժամանակ

Մեքենայի նախագծի մշակման համար ընտրվել են վերոհիշյալ ելակետային դրույթները: Բազային ավտոբեռնիչի ամրաշրջանակում եղանային հանգույցի փոխարեն դրա սահնակի շարժական շրջանակին ամրացվել է կտրող գլխիկներով տեղակայված շեղագերանը, մեծացվել է հիդրոբաքի ծավալը, հիդրոհամակարգի ղեկավարման վահանը տեղադրվել է վարորդի խցիկում, իսկ անիվները փոխարինվել են հատուկ ամբարձիչային միաձույլ անվաղողերով:

Նկ. 2-ում ցույց է տրված մեքենայի սկզբունքային կառուցվածքը. նկ. 2 ա, գ՝ տեսքը վերևից և դիմացից՝ լայնական անցում կատարելիս, նկ. 2 բ, դ-ի ում՝ մեքենայի տեսքը վերևից և դիմացից՝ երկայնական անցումներ կատարելիս:

Ավտոբեռնիչի ամրաշրջանակի (1) թափքի (2) առջևի մասի ուղղաձիգ ուղղորդների (3) սահնակի (4) շեղագերանի (5) վրա տեղակայված են կտրող գլխիկները՝ (6), (7) գույգ սղոցներով (8, 9, 10, 11): Սղոցների գլխիկների, ինչպես նաև դրանց (7) և (10) սղոցների միջև եղած հեռավորությունը $2l_u$ է, իսկ եզրային (8) և (11) սղոցների միջև l_u հեռավորությունը գերազանցում է մեքենայի լայնական չափը 80 մմ-ով:

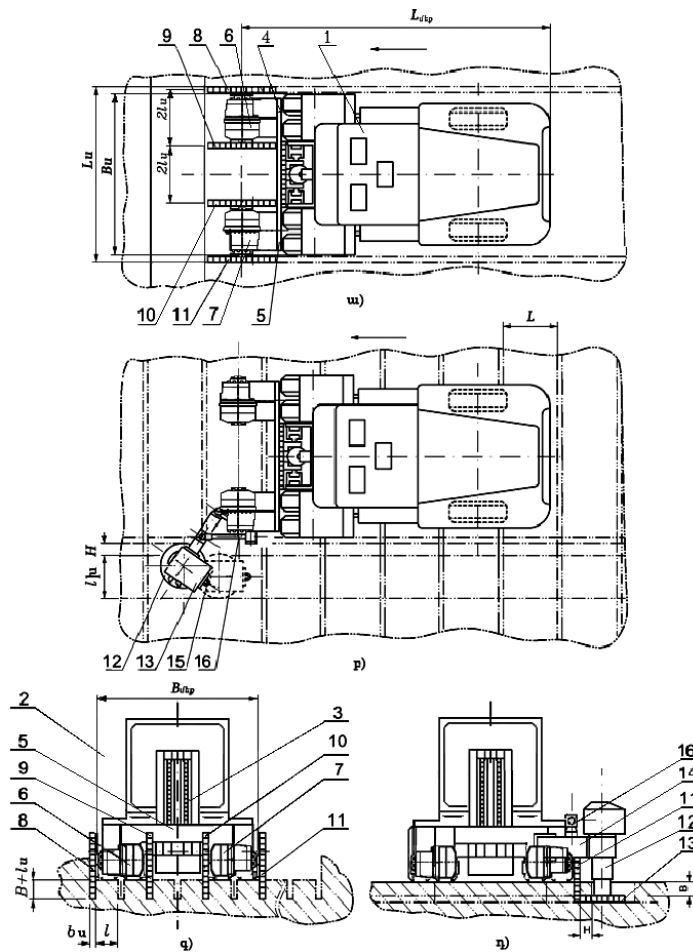
Ուղղաձիգ կտրող գլխիկը (13) հորիզոնական սղոցով (12) թևալծակի (14) միջոցով ամրացված է լայնական կտրման ձախ գլխիկին (7): Հանվող քարի B լայնության և H բարձրության չափերն ապահովվում են ուղղաձիգ և դարձի (15) ու (16) հիդրոգլաններով, իսկ հորիզոնական սղոցը (13) դիրքավորվում է թիկունքային (11) սղոցի առջևում:

Աշխատանքային դանդաղ $S=1000...6000$ մմ/րոպ մատուցումներ ապահովող հիդրոշարժիչն ամրացված է ավտոբեռնիչի թափքին՝ հետընթաց մեխանիզմի մոտ (նկ. 2-ի վրա ցույց չի տրված):

Մեքենայի կարևոր հանգույցները՝ կտրման գլխիկները, նախագծվել են մինչև 40 ՄՊա ամրությամբ տուֆ կտրելու համար, այսինքն, ապահովում են նույն կտրման արագությունները, ինչ որ CMP-026/1 մակնիշի մեքենան: Հաշվվել են կտրման ուժերը, հզորությունները կտրման $B=250$ մմ և $H=200$ մմ խորությունների համար՝ լայնական կտրման, ուղղաձիգ և հորիզոնական՝ ներքնային կտրման համար [3,4]: Մշակվել է մեքենայի նախագծի երկու տարբերակ:

Առաջին տարբերակում կտրող գլխիկները, ինչպես նաև լարահավաք հանգույցը նախագծվել են՝ օգտագործելով նմանատիպ կոնստրուկտորական մշակումները, որոնք առկա են CMP-026/1 մակնիշում, ձգտելով առավելագույնս միօրինակականացնել առանձին հանգույցներ ու մեքենամասեր: Զույգ 800 մմ տրամագծով սղոցներով աշխատող լայնական կտրման գլխիկների համար ընտրվել է 15 կՎտ, իսկ 630 մմ տրամագծի մեկ հորիզոնականի սղոցի համար 7,5 կՎտ հզորությամբ շարժիչներ: Կտրման անհրաժեշտ 4, 6, 8 մ/վ արագությունները, տարբեր ամրությամբ տուֆերի կտրման համար, լարվում են փոփոխվող ատամնանիվներով:

Երկրորդ տարբերակում կտրող գլխիկները փոխարինված են բարձր ոլորող մոմենտ և ցածր պտուտաթվեր ունեցող հիդրոշարժիչներով: Լայնական կտրման գլխիկների համար ընտրվել է POCLAIN HYDRAULICS ընկերության MP 05 մակնիշի հիդրոշարժիչը (հզորությունը՝ 29 կՎտ, ոլորող մոմենտը՝ 3350 Նմ, առավելագույն պտուտաթվերը՝ 195 պտ/րոպ), որն ունի ելքային զույգ լիսեռներ, դասավորված մոտ մեկ քարի երկարության չափով հեռավորությամբ: Ուղղաձիգ կտրման գլխիկի համար ընտրվել է MK 04 մակնիշի հիդրոշարժիչը (հզորությունը՝ 18 կՎտ, ոլորող մոմենտը՝ 1730 Նմ, առավելագույն պտուտաթվերը՝ 150 պտ/րոպ): Չի բացառվում մեքենայում բերվածների փոխարեն օգտագործել ՌԴ –ում արտադրվող РПГ խմբաքանակի հիդրոշարժիչներ: Այս կամ այն տիպի հիդրոշարժիչի ընտրությունը պայմանավորված է գնային գործոնով: Մեքենայի երկրորդ տարբերակի սկզբունքային կառուցվածքը ցույց է տրված նկ. 2-ում:



Նկ.2. Մեքենայի տեսքը վերևից (ա, բ) և դիմացից (գ, դ) լայնական և երկայնական կտրման գործողությունների ժամանակ: Մեքենայի հանգույցները. 1-ինքնաշարժ ամրաշրջանակ, 2-թավիք, 3-ուղղաձիգ ուղղորդիչներ, 4-սահնակ, 5-շեղագերան, 6, 7-կտրող գլխիկներ; 8, 9, 10, 11-ուղղաձիգ սղոցներ; 12-հորիզոնական սղոց; 13 - ուղղաձիգ կտրող գլխիկ, 14-թևալծակ, 15,16-ուղղաձիգ տեղաշարժի և դարձի հիդրոզաններ

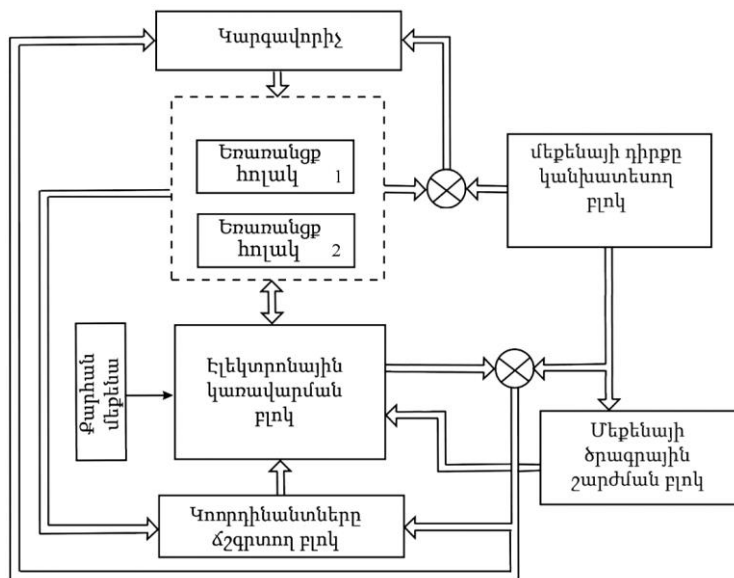
Մեքենայի կառուցվածքային յուրահատկությունը՝ լայնությունն ընդգրկող սղոցային կտրող հարթությունները, ինչպես նաև տեխնոլոգիական գործողությունների նոր հաջորդականությունը, պաշտպանված գյուտի արտոնագրով [2], թույլատրում է կանոնավոր ձևի որմնաքարի հանույթ՝ առանց հանքահրապարակում մնացորդային աստիճանների առաջացման: Մշակված տեխնոլոգիան կիրառելի է նաև շահագործումից դուրս եկած հանքերը՝ աստիճանաձև մնացորդային “ամֆիթատրոնները”, կրկնակի օգտագործելու համար, որոնք գոյացել էին ռելսավոր քարհան մեքենաների օգտագործումից հետո: Դրանց քանակը մեր հանրապետությունում մի քանի տասնյակ

է, և այդ հիմնախնդրի դրական լուծումն էական ազդեցություն կունենա հանքամերձ տարածքներում բնապահպանական վիճակը բարելավելու առումով:

Եթե քարի հանույթի ռելևավոր մեքենայում կտրող գլխիկների մատուցման ուղղագծությունն ապահովվում էր ռելևերի շնորհիվ, ապա կամերային անիվները միաձույլ ռետինե անիվներով փոխարինված նոր մեքենայում ընթացքի ուղղագծությունն ապահովվում է կառավարման հատուկ համակարգով:

Ղեկավարման մեխանիզմը բաղկացած է եռառանցք հոլակային հետևող էլեկտրոնային համակարգից, ելքի ուժեղարարից, էլեկտրամագնիսական հիդրոբաժնաչափիչից՝ զուգահեռ միացված մեքենայի ղեկային վարման մեխանիզմի հիդրոուժեղարարին: Այն հնարավորություն է տալիս անընդհատ հետևել քարհան մեքենայի շարժման ուղղությանը, ակնթարթորեն միջամտել շարժման ուղղության ցանկացած փոփոխություններին, ինչպես նաև կայունացնել մեքենայի ամրաշրջանակի դիրքը հորիզոնական հարթության մեջ: Համակարգի բլոկ - սխեման ներկայացված է նկ. 3-ում:

Մեքենայի շարժման իրական ուղղությունը կտարբերվի հաշվարկայինից, որի համար դուրս են բերվել շեղման մեծության հաշվարկի կախումներ՝ մշակված Կալմանի ֆիլտրով [5, 6], նպատակ ունենալով ստանալ մեքենայի դիրքի կոորդինատներին առավել մոտ արժեքներ: Դրանք հնարավորություն են տալիս ճշգրիտ հաշվարկել քարհան մեքենայի ուղղագիծ շարժման դեպքում տրված հետագծից շեղման մեծությունը և ծրագրավորել մեքենայի էլեկտրոնային կառավարման համակարգն այնպես, որ հանքի իրական աշխատանքային պայմաններում մեքենայի շեղումն ուղղագիծ հետագծից չզերազանցի թույլատրելի սահմանը ոչ ավելի, քան 3...5 մմ:



Նկ. 3. Քարհան մեքենայի կառավարման համակարգի պարզեցված բլոկ-սխեման

Քարի հանույթի ու մշակման մեքենաների արտադրողականությունը գնահատվում է տեխնոլոգիական, ցիկլային և փաստացի ցուցանիշներով [7]: Ինչպես ցույց են տվել հետազոտությունները, և դա հաստատվել է գործնականում, փաստացի արտադրողականությունը մի քանի անգամ փոքր է ցիկլայինից և տեխնոլոգիականից: Քարի հանույթի CMP-026/1 մակնիշի մեքենայի դեպքում կազմում է $1,2 \dots 2,4 \text{ մ}^3/\text{ժամ}$:

Ստացված է 4 ուղղաձիգ և մեկ հորիզոնական սղոցով աշխատող նոր մեքենայի փաստացի արտադրողականության հաշվարկի պարզեցված կապը.

$$U_{\phi} = 240H^2 \cdot L \cdot S_{\text{երկ}} \cdot K_{\sigma} \cdot K_{\omega} \cdot K_{q\sigma} / (H + 4L),$$

որտեղ $S_{\text{երկ}}$ -ը մեքենայի բերված մատուցումն է (երկայնական կամ լայնական), $\text{մ}^3/\text{րոպե}$, K_{σ} - ն՝ մեքենայի օգտագործման գործակիցն ըստ ժամանակի, K_{ω} -ն՝ պիտանի արտադրանքը հաշվի առնող գործակիցը, $K_{q\sigma}$ - ն՝ գումարային ծախսված ժամանակը հաշվի առնող գործակիցը:

Նոր մեքենայի արտադրողականության հաշվարկը կատարվել է $25 \dots 40 \text{ ՄՊա}$ ամրությամբ տուֆից $390 \times 240 \times 188 \text{ մմ}$ չափերով որմնաքարերի հանույթի համար: Սղոցների տրամագծերը՝ 800 մմ և 630 մմ , կտրման արագությունը՝ $200 \text{ մ}^3/\text{րոպե}$, մատուցումը՝ $2000 \text{ մմ}^3/\text{րոպե}$, գործակիցները՝ $K_{\sigma} = 0,80 \dots 0,85$, $K_{\omega} = 0,80 \dots 0,85$,

$K_{q\sigma} = 0,75 \dots 0,85$: Այս պարամետրերի դեպքում նոր մեքենայի արտադրողականությունը $2,1 \dots 2,7 \text{ մ}^3/\text{ժամ}$ է, որը զգալիորեն բարձր է CMP-026/1 մակնիշի մեքենայի արտադրողականությունից: Աճն ապահովվում է մատուցման արագության, պիտանի քարի քանակի և մեքենայի ժամանակային օգտագործման մեծացման, ինչպես նաև օժանդակ գործողությունների ժամանակի ծախսի կրճատման շնորհիվ:

ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

1. Մշակվել է կանոնավոր ձևի որմնաքարի հանույթի անվավոր մեքենայի նախագծերի երկու տարբերակ ավտոբեռնիչի բազայի հիման վրա, աշխատանքային հանգույցների և մեքենամասերի լրիվ կոնստրուկտորական փաստաթղթերի փաթեթով և ղեկավարման ցուցումներով:

2. Մշակվել է նոր մեքենայով կանոնավոր ձևի որմնաքարի հանույթի տեխնոլոգիա, որը բացառում է քարհանքում մնացորդային աստիճանների առաջացումը և թույլ է տալիս կրկնակի օգտագործել շահագործումից դուրս եկած քարհանքերը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. ՀՀ արտոնագիր № 2841 Ա. Քարի արդյունահանման մեքենա / Ջ.Ա. Ասատրյան, Ն.Գ. Մկրտչյան, Ֆ.Ա. Մարյան, Ս.Ս. Հարությունյան.- 01.02.2014.
2. ՀՀ արտոնագիր № 2861 Ա. Քարի արդյունահանման եղանակ / Ջ.Ա. Ասատրյան, Ս.Ս. Հարությունյան, Ն.Գ. Մկրտչյան, Ֆ.Ա. Մարյան.- 05.03.2014.
3. **Տեր-Ազարև Ի.Ա., Սարգսյան Մ.Գ.** Տուֆի հանույթի մեքենաների աշխատանքային օրգանների պարամետրերի ընտրությունը: - Երևան, ՀՊՃՀ, 1992. - 52 էջ:

4. **Варданян К.С.** Техника и технология камнеобработки. – Ереван: Айастан, 1988. – 112 с.
5. **Kalman R.E.** Research Institute for Advanced Study 2: Md. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems.- Baltimore, 2000.- 349 p.
6. **Grewal M.S., Andrews A.P.** Kalman filtering: Theory and practice. – Wiley: Interscience, 2001.- 325 p.
7. Оборудование для производства облицовочных материалов из природного камня / **Н.Г. Картавый** и др.- М.: Машиностроение, 1988.-240 с.

ՀԱՊՀ Գյումրու մասնաճյուղ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 12.04.2015:

Дж.А. АСАТРЯН, С.С. АРУТЮНЯН

ТЕХНОЛОГИЯ И КОЛЕСНАЯ МАШИНА ДЛЯ БЕЗОСТАТОЧНОЙ ДОБЫЧИ КАМНЯ ПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ

Приводятся результаты опытно-конструкторских разработок по созданию колесной машины на базе автопогрузчика и технология добычи стенового камня правильной формы, обеспечивающие существенное повышение степени использования каменного карьера и исключение образования остаточных ступеней.

Ключевые слова: колесная машина, автопогрузчик, добыча камня, дисковая пила, режущая головка.

J.A. ASATRYAN, S.S. HARUTYUNYAN

A TECHNOLOGY AND A WHEEL MACHINE FOR SURPLUS QUARRYING WALL STONE OF A CORRECT FORM

The results of experimental and design developments to create a forklift-based wheel machine and technology for quarrying wall stone of the correct form are introduced, allowing to significantly increase the degree of utilization of the quarry and exclude the formation of the remaining steps.

Keywords : wheel machine, forklift, stone quarrying , circular saw , cutting head.

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ա.Ա. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Վ.Գ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

ԱԼՅՈՒՄԻՆԱՅԻՆ ՀԱԿԱՇՓԱԿԱՆ ՓՈՇԵՀԱՄԱՁՈՒՎԱԾՔՆԵՐԻ
ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱԳՈՑԱՑՄԱՆ ՄԿՁԲՈՒՆՔՆԵՐԸ

Մշակվել են ալյումինի հիմքով երկֆազ և եռաֆազ հակաշփական փոշեհամաձուլվածքների կառուցվածքագոյացման սկզբունքները: Ցույց է տրված, որ երկֆազ մաշակայուն հակաշփական նյութերի երկրորդ ֆազը շփման մակերևույթին պետք է առաջացնի երկրորդային կառուցվածք, ինչն ապահովում է շփման ցածր գործակից և ստեղծում պայմաններ աշխատանքային մակերևույթին բեռնվածության հավասարաչափ բաշխվածության համար: Եռաֆազ կառուցվածքով նյութերի արտաքին բեռնվածությունն իր վրա է վերցնում երրորդ ֆազը, որն ունի ամենամեծ կարծրությունը, իսկ այնուհետև՝ երկրորդ ֆազը: Երկրորդ ֆազի վրա ներգործում են շփման ուժերը, որոնց ազդեցության ներքո շփվող մակերևույթների միջև ձևավորվում են երկրորդային կառուցվածքները, որոնք էլ ապահովում են մեխանիկական հատկությունների դրական գրադիենտ:

Առանցքային բառեր. շփում, մաշում, փոշեհամաձուլվածք, կառուցվածք, ֆազ, դեֆորմացիա, հակամարմին, սահք, մայրակ, կարծրություն, թաղանթ:

Ժամանակակից տեխնիկայի զարգացումն անմիջականորեն կապված է նոր տեխնոլոգիաների մշակման և կոմպլեքս հատկություններով օժտված նյութերի ստեղծման հետ, ինչպիսին է, օրինակ, բարձր տեսակարար ամրությամբ հակաշփական նյութերի ստեղծումը [1]: Նշված խնդրի լուծումը հնարավոր է միայն խոր և գիտականորեն հիմնավորված որոշումների բազայի հիման վրա: Շփման հանգույցների երկարակեցության բարձրացման խնդիրը տարեցտարի ավելի ու ավելի է բարդանում, քանի որ անխուսափելի է գիտության զարգացումը, ինչն իր հերթին հանգեցնում է նոր տեխնիկայի և տեխնոլոգիաների ստեղծմանը և աշխատանքային ռեժիմների խստացմանը [2, 3]:

Առանցքակալային նյութերը՝ կախված աշխատանքային պայմաններից, պետք է ունենան լավ մշակվելիություն, կոռոզիակայունություն, փոքր շփման գործակից, բարձր տեսակարար ամրություն և մաշակայունություն, բարձր ջերմահաղորդականություն և հարվածային մածուցիկություն: Այս պահանջներին մասնակի բավարարող նյութերից են պղնձի համաձուլվածքները՝ հիմնականում անագային բրոնզները: Մակայն դրանք թանկ են, ունեն փոքր տեսակարար ամրություն և ոչ միշտ են բավարարում շահագործման այսօրվա պահանջները: Մաշվածության հիմնական պատճառն է շփման մակերևույթների մաշումը, ինչն արդյունք է մեծ շփման գործակցի: Այդ պատճառով ալյումինային և տիտանային համաձուլվածքներն արդյունաբերական կիրառություն չեն ստացել շփման հանգույցներում, որովհետև նրանք ունեն բարձր

ադիեզիոն հատկություն: Բայց ալյումինային և տիտանային համաձուլվածքները տեսակարար ամրությամբ, կոռոզիակայունությամբ և մի շարք այլ արժեքավոր հատկություններով զգալիորեն գերազանցում են Fe - ի, Ni - ի, Mo - ի և այլ մետաղների համաձուլվածքներին:

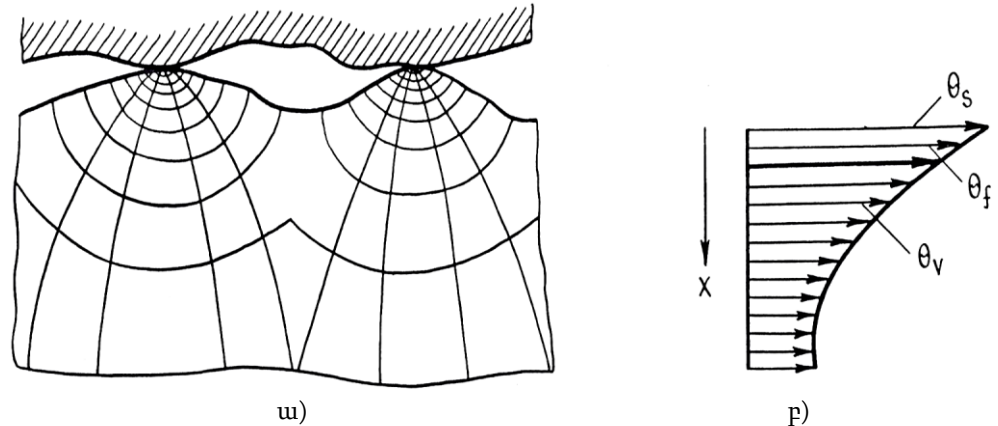
Ի սկզբանե եռակալված հակաշփական նյութերը դիտվում են այնպիսի ավանդական նյութերի փոխարինողներ, ինչպիսիք են բաբիտները և արույրները: 21-րդ դարակզբին խնդիր դրվեց առանցքակալների զանգվածային արտադրությունը գունավոր մետաղներից փոխարինել ավելի քիչ դեֆիցիտ նյութերով: Բայց գիտության արագ զարգացումն առաջ քաշեց նոր հակաշփական նյութերի ստեղծման պահանջ, որոնք ունակ լինեն աշխատելու մեծ արագությունների և բարձր բեռնվածությունների տակ:

Հատկապես ինքնաթիռաշինությունում և մեքենաշինությունում կարևոր խնդիր է այնպիսի նյութերի ստեղծումը, որոնք կարող են աշխատել շփման հանգույցներում առանց քսուքների: Այդպիսի նյութերի մեծ պահանջարկն առկա է հատկապես սննդի, տեքստիլ և թղթի արտադրություններում: Այդ իսկ պատճառով ալյումինի հիմքով հակաշփական համաձուլվածքների ստեղծումը և կառուցվածքի ու հատկությունների ձևավորման սկզբունքների մշակումը հանդիսանում է խիստ արդիական ու հրատապ խնդիր:

Եթե երկու մարմիններ հպված են միմյանց, ապա սկզբնական փուլում մակերևույթների խորդուբորդության պատճառով նրանք միմյանց հպվում են ոչ ամբողջ մակերևույթով (նկ. 1), և եթե այդ մակերևույթներն արտաքին ուժի ազդեցության տակ տեղաշարժվում են միմյանց հակառակ, ապա աշխատանքը հիմնականում ծախսվում է խորդուբորդության հաղթահարման վրա: Հսկայական տեղամասերում ծախսվում է մեծ քանակությամբ էներգիա, ինչի հաշվին նյութը կարող է գտնվել ցանկացած ագրեգատային վիճակում [4]: Հետևաբար՝ հսկայական տեղամասերում կարող են տեղի ունենալ մեխանիկական, ֆիզիկական և քիմիական փոխազդեցություններ, որի արդյունքում ընդարձակվում են հպվող մակերևույթները, այսինքն՝ ավելանում են միջմոլեկուլային և միջատոմային ուժերը: Որոշ ժամանակ անց կարող են ստացվել իդեալական հարթ մակերևույթներ: Այս դեպքում պինդ մարմինների վրա ծախսվող էներգիան հիմնականում կծախսվի միջմոլեկուլային ուժերի հաղթահարման վրա, բացի այդ, որոշակի հանգամանքներում կարող են ընթանալ դիֆուզիոն գործընթացներ:

Շփման հանգույցների համար նյութերի ընտրման կամ նախագծման ժամանակ որպես հիմնական չափանիշներ ընդունվում են շփման գործակիցը և մաշումը: Ինչ վերաբերում է արտաքին բեռնվածությանը, սահքի արագությանը, ջերմաստիճանին, միջավայրին և այլն, ապա դրանք դիտվում են որպես երկրորդային գործոններ: Շփման հանգույցը կաշխատի նորմալ, եթե շփման գործակցի արժեքը փոքր է, այսինքն, եթե ստեղծված են շփման մակերևույթների միջև փոխազդեցության ուժերը փոքրացնող պայմաններ: Այդ դեպքում մաշում տեղի կունենա միայն գործող ցիկլիկ

լարումների հետևանքով առաջացած նյութի հոգնածության պատճառով, այսինքն՝ կիրականացվեն նյութի բոլոր պոտենցիալ հնարավորությունները:

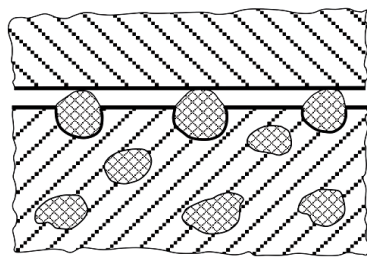


Նկ. 1. Շփման ժամանակ մակերևութային շերտի ջերմաստիճանային դաշտը (ա) և ջերմաստիճանի բաշխումը մակերևութային շերտի խորությամբ (բ)

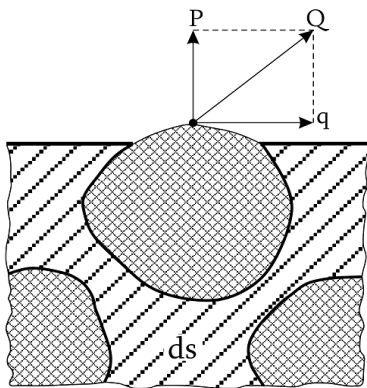
Դիտարկենք Al-ի հիմքով համաձուլվածքների հնարավոր կառուցվածքների աշխատանքային մոդելները, որոնք շփման ժամանակ ապահովում են շփման գործակցի նվազագույն արժեք և բարձր մաշակայունություն: Վերցնենք երկֆազ կառուցվածքով կոմպոզիցիոն նյութ: Այդպիսի մոդելներում առաջին ֆազ է հանդիսանում մայրակը, իսկ երկրորդ ֆազ՝ քսանյութը, որը շփման մակերևութին ապահովում է երկրորդային կառուցվածքի առաջացումը՝ նվազեցնելով շփման գործակիցը:

Նկ. 2 (ա)-ում բերված է այլումինի հիմքով երկֆազ նյութի աշխատանքային մոդելի սխեման, իսկ նկ. 2 (բ)-ում՝ նրա կառուցվածքի մեկ բջիջը, որը գտնվում է լարվածային վիճակում: Ընդունում ենք, որ արտաքին ուժերի ազդեցության տակ առաջացող դեֆորմացիաները չպետք է գերազանցեն հիմնական ֆազի առաձգականության սահմանը, բացի այդ հակամարմնի նյութը պետք է լինի ավելի կարծր, քան հիմնական ֆազին է, որպեսզի աշխատանքի ընթացքում մաշումը տեղի ունենա հակաշփական նյութի հաշվին: Պայմանի համաձայն՝ երկրորդ ֆազը պետք է բաղկացած լինի անիզոտրոպ կառուցվածք ունեցող քիմիական միացություններից (նկ. 3): Էներգետիկ նկատառումներից ելնելով՝ սահքի որևէ տրված ուղղության դեպքում նախընտրելի են համարվում այն դիսլոկացիաները, որոնք ունեն Բյուրգերսի նվազագույն վեկտորներ: Սահքի համակարգը, Բյուրգերսի վեկտորների հետ միաժամանակ, որոշվում է նաև սահքի հարթությամբ: Սովորաբար սահքի հարթություններ են համարվում բյուրեղավանդակի ատոմների ամենախիտ դասավորություն ունեցող հարթությունները: Քանի որ հեքսագոնալ բյուրեղավանդակ ունեցող մետաղներում առանցքների մեծ հարաբերության դեպքում $c/a > 8/3$, ամենախիտ դասավորությունն ունեն

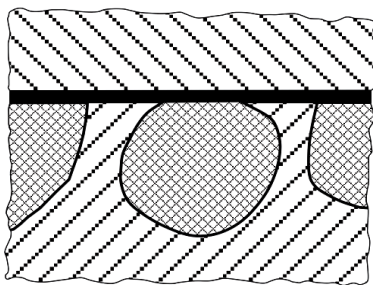
բազիսային հարթությունները (0001), իսկ առանցքների փոքր հարաբերության դեպքում $c/a < 8/3$ ՝ առաջին կարգի պրիզմային հարթությունները (1010), ապա գործող սահքի ընտրությունը կախված է առանցքների հարաբերությունից:



ա)

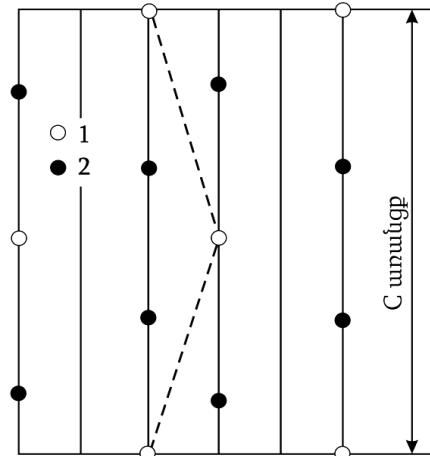


բ)

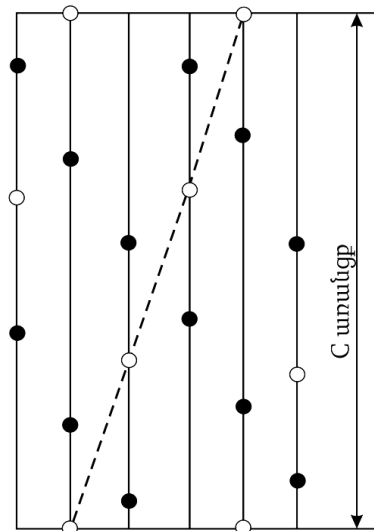


գ)

Նկ. 2. Ալյումինի հիմքով երկֆազ նյութի կառուցվածքային մոդելը.
ա) մինչ աշխատանքը, բ) արտաքին ուժերի ներգործության մեխանիզմի սխեման, գ) աշխատանքի ընթացքում



ա)



բ)

Նկ. 3. Հեքսագոնալ կառուցվածքները շփման ընթացքում.
ա) մինչ աշխատանքը, բ) աշխատանքի ընթացքում

Հավանականության տեսության համաձայն [5] կարելի է ասել, որ արտաքին ուժի ազդման յուրաքանչյուր ցիկլի ժամանակ, անկախ երկրորդ ֆազի քանակից, Z առանցքով բյուրեղավանդակների քանակը, որոնք համընկնում են N նորմալի հետ, կկազմի ընդհանուր բյուրեղավանդակների թվի $1/3$ -ը: Եթե ազդող ուժի նորմալը համընկնում է Z առանցքի ուղղության հետ, ապա շփման ուժերի և մետաղագրական հարթությունների (1001) թույլ կապերի հաշվին բազիսային հարթությունների միջև առաջանում է սահք, որի համար անհրաժեշտ է հետևյալ պայմանի ապահովումը.

$$F_T \geq \frac{1}{3} K \cdot \tau_{cg} \cdot a, \quad (1)$$

որտեղ F_T -ն շփման ուժն է, τ_{cg} -ն՝ երկրորդ ֆազի դիմադրությունը սահքին, α -ն՝ երկրորդ ֆազի մակերևույթի հպվող հատվածը, K -ն՝ գործակից է, որը հաշվի է առնում երկրորդ ֆազի նյութի հատկությունների փոփոխությունը, կախված նրա վրա ազդող արտաքին գործոններից (ջերմաստիճան, ճնշում և այլն):

Աշխատանք [6]-ից հայտնի է, որ

$$F_T = q \cdot f, \quad a = q / \sigma, \quad (2)$$

որտեղ f -ը շփման գործակիցն է, σ -ն՝ հակամարմնի ամրության սահմանը, q -ն՝ երկրորդային ֆազի առանձին հատիկի վրա ազդող արտաքին ուժի մեծությունը:

(2) բանաձևում տեղադրելով F_T -ի և α -ի արժեքները, կստանանք՝

$$q \cdot f \geq K \cdot \tau_{cg} \cdot q / \sigma, \quad f \geq K \cdot \tau_{cg} / \sigma: \quad (3)$$

Երկրորդ ֆազի հատիկների $2/3$ -ի համար առաձգականության սահմաններում դեֆորմացիաները սահմանափակող պայմանը կարող է ներկայացվել հետևյալ կերպ՝

$$nq + nF_T \leq 2/3 \left(\sigma_{0,2} \cdot ds \cdot n + \sigma_{0,2} \cdot n \cdot \frac{ds}{2} \right): \quad (4)$$

Քանի որ nq -ն շփման հանգույցի վրա ազդող ուժն է, իսկ $n \cdot ds$ -ը՝ շփման մակերևույթին երկրորդ ֆազի մասնիկների գումարային մակերևույթը, ապա (4) բանաձևում տեղադրելով F_T -ի արժեքը, կստանանք՝

$$Q \leq \frac{\sigma_{0,2} \cdot S}{1 + f}, \quad Q \leq \frac{4\pi R^2 \cdot n \cdot \sigma_{0,2}}{1 + f}, \quad (5)$$

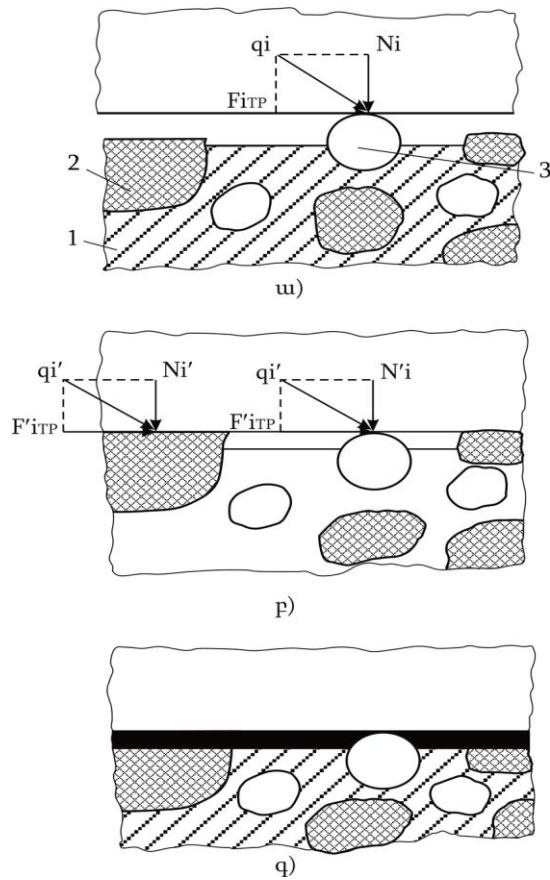
որտեղ $\sigma_{0,2}$ -ը մայրակի հոսունության պայմանական ամրության թույլատրելի արժեքն է, S -ը՝ շփման տեղամասում երկրորդ ֆազի մասնիկների գումարային մակերևույթը, R -ը՝ երկրորդ ֆազի մասնիկների միջին շառավիղը:

(3) բանաձևի ապահովման դեպքում աշխատանքային մակերևույթներին, ի հաշիվ երկրորդ ֆազի, կառաջանան թաղանթներ (երկրորդային կառուցվածքներ), որոնք կապահովեն շփման հանգույցի նորմալ աշխատանքը, այսինքն՝ կապահանջվի արտաքին էներգիայի նվազագույն ծախս: (5) բանաձևի պայմանի ապահովման դեպքում շփվող նյութերում չեն առաջանում մնացորդային պլաստիկ դեֆորմացիաներ, այսինքն՝ տեղի չի ունենում մակերևութային թաղանթի ժամանակից շուտ քայքայում: Մաշումը տեղի է ունենում միայն նյութի հոգնածության հետևանքով:

Ինչպես տեսնում ենք, նվազագույն շփման գործակցով և բավարար մաշակայունությամբ հակաշփական նյութերի ձևավորման դեպքում անհրաժեշտ է, որ երկրորդ ֆազը պատրաստված լինի այնպիսի միացություններից, որոնք ունեն սափքի նկատմամբ թույլ դիմադրություն (սուլֆիդներ, սելենիդներ, ֆոսֆիդներ, պոլիմերներ, դյուրահալ մետաղներ և այլն), իսկ առաջին ֆազը պետք է ունենա բարձր ամրություն, որին կարելի է հասնել լեգիրումով:

Այսպիսով, (3) և (5) բանաձևերը պարունակում են այն հիմնական նախանշանները, որոնք բնորոշ են երկֆազ մաշակայուն հակաշփական փոշեհամաձուլվածքներին, որոնց աշխատանքի սկզբունքն այն է, որ երկրորդ ֆազը շփման մակերևույթին պետք է առաջացնի երկրորդային կառուցվածք: Դա ոչ միայն ապահովում է շփման ցածր գործակից, այլ նաև պայմաններ է ստեղծում աշխատանքային մակերևույթին բեռնվածության հավասարաչափ բաշխվածության համար: Մայրակի առաձգականության սահմանը գերազանցող բեռնվածությունների դեպքում տեղի է ունենում պլաստիկ դեֆորմացում, ինչի արդյունքում թաղանթը քայքայվում է և կորցնում իր հակաշփական հատկությունները: Հետևաբար՝ երկֆազ կառուցվածքով համաձուլվածքները կարող են աշխատել միայն թեթև և միջին բեռնվածությունների տակ:

Հետազոտությունների հաջորդ փուլի նպատակն է մշակել հակաշփական նյութի կառուցվածքային այնպիսի մոդել, որի դեպքում նյութն աշխատի համեմատաբար ծանր պայմաններում (մեծ բեռնվածություններ, արագություններ, չոր շփում և այլն): Այդ խնդրի լուծման համար դիտարկենք եռաֆազ կառուցվածքով ալյումինային փոշեհամաձուլվածքներ: Եռաֆազ կառուցվածքով նյութերի աշխատանքի մեխանիզմը չոր և սահմանային շփման պայմաններում կարելի է բացատրել հետևյալ կերպ: Արտաքին բեռնվածությունն իր վրա է ընդունում երրորդ ֆազը, որն ունի ամենամեծ կարծրությունը (նկ. 4 ա), որի ազդեցության ներքո էլ կդեֆորմացվեն հիմքի հատիկները, իսկ այնուհետև նաև երկրորդ ֆազը (նկ. 4 բ): Երկրորդ ֆազի վրա կսկսեն գործել շփման ուժերը, որոնց ազդեցության ներքո շփվող մակերևույթների միջև կսկսեն ձևավորվել երկրորդային կառուցվածքներ, որն էլ կապահովի մեխանիկական հատկությունների դրական գրադիենտ:



Նկ. 4. Եռաֆազ նյութի կառուցվածքային մոդելը. ա) մինչ հարմարեցումը, բ) հարմարեցումից հետո, գ) շփման ընթացքում. 1 - առաջին ֆազ, 2 - երկրորդ ֆազ, 3 - երրորդ ֆազ

Շփման հանգույցներում արտաքին բեռնվածությունների թույլատրելի արժեքները կախված են առաձգական դեֆորմացումներից, այսինքն՝ մայրակի նյութի հատկություններից և նրանում առկա կարծր մասնիկների չափսերից ու բաշխվածությունից: Այդ կախվածության որոշման համար օգտվենք առաձգականության տեսությունից [7], որի համաձայն ուժի և դեֆորմացման միջև առկա է հետևյալ կապը՝

$$\varepsilon = 1,231 \sqrt[3]{(q_i / E)^2 \cdot 1 / R}, \quad (6)$$

որտեղ ε -ը մայրակի դեֆորմացման աստիճանն է q_i ուժի ազդեցության տակ, E -ն՝ մայրակի առձգականության մոդուլը, R -ը՝ կարծր մասնիկի շառավիղը:

Ընդունում ենք, որ կարծր մասնիկները գնդաձև են և գրեթե չեն դեֆորմացվում: Մնացորդային դեֆորմացումների թույլատրելի փոքր արժեքների համար

$$\varepsilon = 2R\sigma_{hws}/E, \quad (7)$$

որտեղ σ_{hws} -ը մայրակի նյութի համարժեքության սահմանն է:

(6) և (7) բանաձևերից ստանում ենք՝

$$q_i = 2R^2 \cdot \sigma_{hws} \sqrt{\sigma_{hws} / E} : \quad (8)$$

Քանի որ հատիկի վրա ազդող ուժը նորմալ և շփման ուժերի գումարն է.

$$\bar{q}_i = \bar{F}_{i_2} + \bar{N},$$

ապա՝

$$q_i^2 = F_{i_2}^2 + N_i^2, \quad F_{i_2} = fN_i, \quad N_i = q_i / \sqrt{1 + f^2}, \quad (9)$$

որտեղ f -ը հպման տեղամասում շփման գործակիցն է:

(8) և (9) բանաձևերից որոշում ենք մեկ հատիկի վրա ազդող թույլատրելի ուժի արժեքը.

$$q_i = 2R^2 \cdot \sigma_{hws} \sqrt{\sigma_{hws} / E(1 + f^2)} : \quad (10)$$

Շփման հանգույցում թույլատրելի ընդհանուր բեռնվածությունը կլինի հպման մեջ գտնվող հատիկների վրա ազդող ուժերի գումարը.

$$Q = \sum N_i = S \cdot m \cdot N_i, \quad (11)$$

որտեղ S -ը շփվող դետալների հպման մակերեսն է, իսկ m -ը՝ միավոր մակերեսում հատիկների քանակը:

Առաձգականության տեսության համաձայն՝ գլանաձև մակերևույթների համար ունենք՝

$$S = b \cdot \ell = 2,15 \sqrt{\frac{P \cdot d^2}{E \cdot \delta}} \cdot \ell, \quad (12)$$

որտեղ b -ն և ℓ -ը նոմինալ հպման լայնությունը և երկարությունն են, P -ն՝ միավոր երկարության վրա ընկնող բեռնվածությունը, $P = Q / \ell$, որտեղ d -ն գլանական մակերևույթի տրամագիծն է, δ -ն՝ լիսեռի և վռանի միջև առկա բացակի նոմինալ արժեքը:

Հպման միավոր տեղամասում հատիկների քանակը կլինի.

$$m = \frac{\alpha}{\pi \cdot R^2}, \quad (13)$$

որտեղ α -ն միավոր մակերեսում առկա կարծր մասնիկների գումարային մակերեսային է: Տեղադրելով այս արժեքները (2) բանաձևում, կստանանք.

$$Q = \frac{4,5d^2 \cdot \alpha^2 \cdot \ell \cdot N_i}{E \cdot \delta \cdot \pi^2 \cdot R^2} : \quad (14)$$

Հաշվի առնելով (10) և (14) բանաձևերը, կարելի է գրել.

$$Q = \frac{18d^2 \cdot \alpha^2 \cdot \ell \cdot \sigma_{huf}^3}{E^2 \cdot \delta \cdot \pi^2 \cdot (1+f)} : \quad (15)$$

σ_{huf} -ի և E -ի նշանակությունը համապատասխանում է շփման տեղամասում նյութի հատկությանը տվյալ ջերմաստիճանում:

Աշխատանքի նման մեխանիզմի դեպքում հակամարմնի հետ հպման մեջ գտնվող շփվող մարմինների մաշումը պայմանավորված է առաձգական դեֆորմացումների կրկնվող ցիկլերի հետևանքով առաջացած մայրակի հոգնածությամբ: Աշխատանք [8]-ում կատարված հետազոտությունների համաձայն՝ առաձգական դեֆորմացումների կրկնվող ցիկլերի քանակը, որը հանգեցնում է մայրակի նյութի քայքայման, կլինի՝

$$n = (\sigma_{տեղմ}/\sigma)^t, \quad (16)$$

որտեղ $\sigma_{տեղմ}$ -ը սեղմման լարումն է, որը հանգեցնում է նյութի քայքայմանը մեկանգամյա ազդեցությունից հետո, σ -ն՝ գործող լարումը, որը հանգեցնում է առաձգական դեֆորմացումների, իսկ t -ն՝ հոգնածության կորի ցուցանիշը:

ո թվով ցիկլերից հետո մաշված շերտի խորությունը հավասարվում է հատիկի $2R$ մեծությանը: τ ժամանակահատվածից հետո մաշվածությունը կազմում է՝

$$I = 2R \cdot K / n, \quad (17)$$

որտեղ K -ն τ ժամանակահատվածում լիսեռի պտույտների թիվն է: K -ն կարելի է ներկայացնել V գծային արագության միջոցով և d տրամագծով լիսեռի համար կլինի.

$$K = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot V \cdot \tau}{\pi \cdot d} : \quad (18)$$

Տեղադրելով արժեքները (6), (7) և (8) բանաձևերում, կստանանք՝

$$I = \frac{1,2 \cdot 10^5 \cdot V \cdot \tau \cdot \sigma^t \cdot R}{\pi \cdot d \cdot \sigma_{տեղմ}^t} : \quad (19)$$

(3), (15) և (19) բանաձևերի վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ այլումինի հիմքով մաշակայուն հակաշփական փոշեհամաձուլվածքները կունենան բարձր շփատեխնիկական հատկություններ (f , I , Q), եթե նրանց կառուցվածքում ապահովվի առաջին և երկրորդ ֆազերի մեխանիկական հատկությունների ($\sigma_{\text{սեղմ}}$, E , τ) լավագույն հարաբերակցություն, ինչպես նաև երրորդ ֆազի (α) ծավալների և (R) չափսերի միջև օպտիմալ հարաբերություն:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Костецкий Б.Н.** Трение, смазка и износ в машинах.- Киев: Техника, 1970.-315 с.
2. Основы трибологии / **А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.**- М.: Машиностроение, 2001.- 664 с.
3. **Мышкин Н.К., Петроковец М.И.** Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии.- М.: Физматлит, 2007.- 368 с.
4. **Беляев Н.М.** Сопротивление материалов.-М.: Наука, 1965.- 856 с.
5. **Гегузин Я.Е., Крагельский И.В., Парицкая Л.Н.** О взаимном схватывании металлов при высоких температурах под давлением // О природе схватывания твердых тел.- М.: Наука, 1968.- С. 5-8.
6. **Демкин Н.Б.** Контактное шероховатых поверхностей.- М.: Наука, 1970.- 226 с.
7. **Гутер Р.С., Овчинский Б.В.** Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта.- М.: Наука, 1970.- 432 с.
8. **Крагельский И.В., Михин Н.М.** Узлы трения машин.- М.: Машиностроение, 1984.- 280 с.

ՀԱՊՆ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 12.04.2015:

С.Г. АГБАЛЯН, А.А. ПЕТРОСЯН, В.Г. ВАРДАНЫ

ПРИНЦИПЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ СПЛАВОВ

Разработаны принципы структурообразования двух- и трехфазных антифрикционных сплавов на основе алюминия. Показано, что у двухфазных износостойких антифрикционных материалов вторая фаза на контактной поверхности должна создать вторичную структуру, которая обеспечивает низкий коэффициент трения и создает условия для распределения поверхностной нагрузки на рабочей поверхности. У материалов трехфазной структуры внешнюю нагрузку на себя берет третья фаза, которая имеет самую высокую твердость, а затем вторая фаза. На второй фазе есть силы трения, под влиянием которых между контактными поверхностями формируются вторичные структуры, обеспечивающие положительный градиент механических свойств.

Ключевые слова: трение, износ, порошковый сплав, структура, фаза, деформация, контртелo, сдвиг, матрица, твердость, пленка.

S.G. AGHBALYAN, A.A. PETROSYAN, V.G. VARDANYAN
PRINCIPLES OF STRUCTURIZATION OF ALUMINIUM ANTIFRICTION
POWDER ALLOYS

The principles of structurization of two and three-phase antifriction alloys on the basis of aluminum are developed. It is shown that in the case of two-phase wearproof antifriction materials, the second phase on the contact surface is to create a secondary structure which provides a low coefficient of friction and creates conditions for distribution of superficial loading on the working surface. In the case of the materials with a three-phase structure, the external loading is taken by the third phase which has the highest hardness, and then the second phase. On the second phase, there are friction forces under whose influence, secondary structures are formed between the contact surfaces ensuring a positive gradient of mechanical properties.

Keywords: friction, wear, powder alloy, structure, phase, deformation, antibody, shift, matrix, hardness, film.

С.Г. АЙРАПЕТЯН, В.А. МАРТИРОСЯН

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА ИЗ
СЛАНЦЕВЫХ УГЛЕЙ АРМЕНИИ**

Исследована возможность переработки углесланцевых руд и концентратов Армении методом тигельной плавки с флюсами и окисью свинца с целью получения свинцового коллектора, дальнейшая окислительная плавка которого сопровождается получением осадка золотосеребряного сплава. Выбраны оптимальные условия тигельной и окислительной плавки для обеспечения максимального выхода золота и серебра.

Ключевые слова: углесланцы, огарок, драгоценные металлы, соляно-кислотное выщелачивание, тигельная плавка, солевое хлорирование.

Введение. В настоящее время в Армении насчитывается более десяти рудников (Шамут, Антарамут, Бадиван, Джаджур, Иджеван, Дилижан, Джерманис, Нор-Аревик и др.) бурых и сланцевых углей (далее углесланцы). Согласно данным исследований, полученным в разное время, эти ископаемые имеют высокую зольность и низкую теплотворность, в связи с чем они непригодны для нужд энергетики в качестве топливного сырья. Одновременно эти углесланцы содержат разнородные металлы, в том числе золото, серебро и металлы платиновой группы, что диктует необходимость разработки технологии переработки сланцев с получением качественного угольного топлива с предварительным удалением содержащихся в этих ископаемых ценных металлов и других примесей. Таким образом, углесланцы представляют собой не только сырье угольного топлива, но и источник получения драгоценных металлов. Целью настоящей работы является разработка технологии переработки углесланцев Армении с комплексным извлечением драгоценных металлов и получения качественного угольного топлива. Предлагаемая технология комплексной переработки углесланцев может явиться ведущим направлением в металлургической промышленности Армении XXI века.

Методика проведения эксперимента. Для изучения возможности извлечения золота и серебра в опытах использовались углесланцы и полученные их обогащением гравиконцентраты Нор-Аревикского месторождения. Полный силикатный анализ указанных углесланцев и концентратов проводился в центральной лаборатории ЗАО “Лернаметаллургияи институт”, результаты которых приведены в табл. 1.

Согласно имеющимся сведениям, в 1,5...2,0% не указанных в таблице данных содержатся как редкие (Be, Mo, Nb, V, Zn, Y), так и благородные (Au и

Ag) металлы. Согласно аналитическим данным, содержание Au в углеспанцевых рудах Нор-Аревика составляет 0,4...1,6 г/т, Ag - 1,8...120 г/т, а в гравиконцентрах - соответственно Au - 8...10 г/т, Ag - 17...21 г/т [1- 4]. В опытах для извлечения золота и серебра применяли способ тигельной плавки сырья с флюсами (сода, бура, уголь) и окисью свинца или глетом [5].

Таблица 1

Результаты полного силикатного анализа углеспанцев и гравиконцентратов
Нор-Аревикского рудника (вес. %)

Сырье	C	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Всего
Руда	43,34	31,63	8,46	7,81	5,74	0,75	0,19	0,08	0,05	98,05
Гравиконц.	16,72	40,84	18,59	8,00	12,69	0,86	0,20	0,09	0,50	98,49

Экспериментальная часть. Вначале углеспанцевое сырье типа Ар-лп-2 размерами частиц до 10 мм обжигалось при температуре 450...500 °С с продолжительностью 3 часа. Процесс обжига осуществлялся с помощью электрической муфельной печи в прямоугольных керамических емкостях (120х80 х 25 мм) с целью удаления углерода сырья. Недообожженные обломки обжигались повторно аналогичными режимами и способами, только после измельчения до 300 мкм. Полученные указанными методами обожженные образцы или огарки далее подвергались тигельной плавке. При изготовлении плавильной шихты на каждую пробу огарка добавляли безводную техническую соду - 80 г, буру - 40 г, глет - 60 г и углеродистый восстановитель - до 5 г. Для разделения золота и серебра образующиеся в результате тигельной плавки свинцовые коллекторы (веркблей) драгоценных металлов подвергались окислительной плавке в специальных цементных тиглях (купелирование). Во время купелирования основная масса свинца из веркблея вместе с недорогими металлами всасывается в состав цементного тигеля, а оставшая часть улетучивается в виде газов.

Основные данные режимов тигельной плавки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Режимы тигельной плавки огарка углеспанцевой руды и количества полученного свинцового коллектора драгоценных металлов

№ опыта	Руда, г	Огарок, г	Плавка		Свинцовый коллектор, г
			температура, °С	время, ч	
1	200	77	980...1060	1,0	50
2		78	1000	1,2	49
3		80	960...1050	1,5	59
4		81	1000...1050	1,0	56
5		79	1050...1150	0,75	57

В результате купелирования на дне указанной емкости образуется королькообразный сплав золота и серебра (сплав Доре). Основные показатели процессов купелирования приведены в табл.3.

Таблица 3

Основные показатели купелирования свинцовых веркблей, полученных тигельной плавкой обожженных проб углеспанцевой руды

№ опыта	Веркблей, г	Купелирование		Сплав Доре, мг	Au		Ag	
		температура, °C	время, ч		мг	г/т	мг	г/т
1	50	920...950	2,8	0,52	0,08	0,40	0,44	2,20
2	49	920...970	2,5	0,30	0,05	0,25	0,25	1,25
3	59	920...970	2,7	0,40	0,07	0,35	0,33	1,65
4	56	920...980	2,5	0,50	0,08	0,40	0,42	2,10
5	57	920...960	2,5	0,35	0,05	0,30	0,30	1,45

Следует добавить, что для выделения золота и серебра полученные в опытах купелирования сплавы Доре выщелачивались слабым раствором азотной кислоты.

В следующих опытах в качестве сырья использовался обогащенный по содержаниям драгоценных металлов гравиконцентрат типа Гр-758. Для удаления содержания угля гравиконцентрат подвергался окислительному обжигу (температура 450...500 °C, продолжительность - 3 часа). Основные показатели тигельной плавки гравитационного концентрата и купелирования свинцовых веркблей приведены соответственно в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Масса свинцового веркбля в зависимости от режима плавки углеспанцевого гравиконцентрата

№ опыта	Концентрат, г	Огарок концентрата, г	Режим плавки		Веркблей, г
			температура, °C	время, ч	
1	50	35	960...1000	1,9	37
2		36	930...1080	2,0	42
3		36	920...1080	1,8	33
4		37	1000...1180	2,0	41
5		34	1000...1100	2,0	40
6	100	72	1050...1080	1,2	34

Таблица 5

*Результаты купелирования свинцовых веркблей в тигельной плавке огарка
углесланцевого гравиконцентрата*

№ опыта	Веркблей, г	Купелирование		Сплав Доре, мг	Au		Ag	
		температура, °C	время, ч		мг	г/т	мг	г/т
1	37	920...1000	1,5	2,80	0,31	6,20	2,49	49,8
2	42	920...980	1,6	4,40	0,50	10,0	3,90	78,0
3	33	920...1000	1,5	1,70	0,42	8,4	1,28	25,6
4	41	920...1040	2,0	3,10	0,71	14,2	2,39	47,8
5	40	1000...1030	1,7	2,40	0,59	10,8	1,81	36,2
6	34	950...1050	1,0	3,07	0,47	9,4	2,60	52,0
7	35	950...1050	1,0	2,37	0,37	7,5	2,00	40,0

Из приведенных в табл. 4 данных видно, что более продуктивны опыты 2, 4 и 5, где плавка опытных образцов осуществлялась в температурном интервале 1000...1100 °C и продолжительностью 2 часа. Данные табл. 5 показывают, что сравнительно эффективны результаты тех опытов, где купелирование веркблей проводилось в температурном интервале 950...1050 °C в течение 1,0...1,5 часа.

Как видно из результатов опытов, средние показатели извлечения золота и серебра из указанных количеств исходных углесланцевых руд (тип пробы Ар-лп-2) и полученных путем переработки концентратов (Гр. 758) соответственно составляют: Au - 0,34 г/т, Ag - 1,7 г/т и Au - 9,50 г/т, Ag - 47,5 г/т.

Закключение. Полученные в работе результаты исследования метода извлечения золота и серебра тигельной плавкой и купелированием довольно реальные, так как они, в основном, совпадают с исходными и соответствующими показателями. Извлекаемые в опытах при переработке сланцевых руд минимальные (с точностью до сотых долей миллиграмма) содержания золота говорят о чувствительности использованной технологии. Усредненные данные извлекаемого из гравиконцентрата золота, по сравнению с исходными и, соответственно, максимальными содержаниями, составляют 95%, что подтверждает продуктивность процесса. Из полученных в работе показателей вытекает, что использованная в работе технология, включающая обжиг драгоценных металлсодержащих углесланцевых материалов, тигельную плавку огарка и последующее купелирование веркбля, отличается своей продуктивностью извлечения золота и серебра и может стать необходимой основой для дальнейшего совершенствования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алоян П.Г., Алоян Гайк П.** Платиноиды в промышленных рудах Армении. - Ереван: ГЕОИД, 2003.-182 с.
2. **Алоян П.Г., Алоян Г.П.** Металлоносность черносланцевых (терригенно-углеродистых) комплексов Армении // Изв. НАН РА. Науки о Земле. - 2003.- № 3.- С. 8-13.
3. **Алоян П.Г., Алоян Г.П.** Терригенно–углеродистые комплексы Армении как новый формационный тип благороднометалльного сырья // Вестник Инженерной академии Армении.- 2004.- Т.1, № 1.- С. 58-61, ISBN 99942-922-0-5.
4. **Алоян П.Г., Алоян Гайк П.** Редкие металлы в промышленных рудах Армении. - Ереван: Геоид, 2005. - 335с. ISBN 99930-900-2-6.
5. Патент RU 2156820. МПК С 22В 11/02. Способ переработки концентратов гравитационного обогащения, содержащих благородные металлы / **С. Г. Рыбкин, А.Ф. Панченко, Г.М. Панченко, Н.Н. Кулинин.** - Опубл. 27.09. 2000.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 10.02.2015.

Ս.Գ. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ, Վ.Հ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԹԵՐՐԻԳԵՆԱՅԻՆ ԱՇՈՒՆԵՐԻՑ ՈՍԿՈՒ ԵՎ ԱՐԾԱԹԻ ԿՈՐԶՄԱՆ ՀԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Հետազոտվել է Հայաստանի թերթաքարային ածուխների և խտանյութերի մշակման՝ կապարի օքսիդով և ֆլյուսներով հալքանոթային հալման եղանակի հնարավորությունը: Դրան պատկերվել է կապարային կուտակիչի ստացումն է, որի օքսիդիչ հալումն ուղեկցվում է ոսկիարծաթային համաձուլվածքի նստվածքի առաջացմամբ: Ընտրված են ոսկու և արծաթի առավելագույն ելքն ապահովող հալքանոթային և օքսիդիչ հալման օպտիմալ պայմանները:

Առանցքային բառեր. թերթավոր ածուխներ, այրուք, թանկարժեք մետաղներ, աղաթթվային տարրալուծում, հալքանոթային հալում, աղային քլորացում:

S.G. HAYRAPETYAN, V.H. MARTIROSYAN

INVESTIGATING THE POSSIBILITY OF EXTRACTING GOLD AND SILVER FROM COAL SHALE IN ARMENIA

The possibility of processing the coal shale ores and concentrates of Armenia by the method of crucible process with fluxes and lead oxides for obtaining a lead collector is investigated whose further oxidizing smelting is accompanied by obtaining the precipitate of a gold – silver alloy. Optimal conditions for crucible and oxidizing smelting are selected to provide the maximal extraction of gold and silver.

Keywords: coal shale, cinder, precious metals, salt - acid leaching, crucible melting, salt chlorination.

А.О. ОВСЕПЯН

**КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА СУЛЬФИДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ
МОЛИБДЕНА**

Проведено экспериментально–теоретическое и прикладное исследование комплексной переработки сульфидных концентратов молибдена, в результате чего получены: обожженный молибденовый концентрат с содержанием меди и серы соответственно не более 0,08 и 0,05%; дисульфид молибдена высокой чистоты для смазочного материала; дисилицид молибдена непосредственным синтезом из сульфидных молибденовых концентратов; молибдат свинца высокой чистоты и стехиометрического состава для выращивания монокристаллов; лигатурные материалы для легирования стали молибденом; сульфиды кремния для флотации медно-молибденовых руд.

Ключевые слова: сульфидный концентрат, синтез, дисилицид и дисульфид молибдена, молибдат свинца, сульфид кремния.

Флотационные молибденитовые концентраты содержат 80...85% MoS_2 . В концентрате содержатся также рений, селен, теллур, висмут, осмий, примеси сульфидов цветных металлов, пустая порода, флотомасла и др. Молибденитовый концентрат Каджаранского месторождения имеет примерно следующий химический состав, %: 48,4 Mo; 0,87 Cu; 2,75 Fe; 6,14 SiO_2 ; 1,06 Al_2O_3 ; 1,02 CaO; 0,47 MgO; 33,1 S; 4,0 H_2O + флотомасла; 0,025 Re, Se, Te, Bi и др.

Более 80% добываемого молибдена применяют в черной металлургии в виде ферромолибдена для производства качественных легированных сталей, остальное – в виде металлического молибдена (сплавы, порошки, проволоки, прутки, листы) и химических соединений дисульфида молибдена (в качестве смазочного материала), дисилицида молибдена (высокотемпературные нагреватели, термодпары, катализаторы), молибдата натрия (краски), молибдата свинца (монокристаллы для лазерной техники) и др.

Учитывая возрастающие требования ферросплавной промышленности, в частности, к качеству молибденового огарка, необходимо разработать альтернативные технологии, обеспечивающие высокую чистоту и комплексную переработку концентрата.

Наличие в Республике Армения богатейших залежей медно-молибденовых руд благоприятствует созданию производства химических соединений высокой чистоты. Легирование молибденсодержащих сталей осуществляют путем присадки ферромолибдена, молибдата кальция или оксида молибдена в печь. Ферромолибден – лигатурный сплав, сырьем для которого служит обожженный молибденовый концентрат со строго ограниченным количеством примесей (меди, мышьяка,

олова, сурьмы, фосфора, серы), сильно влияющих на свойства стали. Особое внимание уделяется обеспечению минимального количества меди, что способствует увеличению зерна стали и делает сталь хладноломкой. Однако проведение глубокой очистки молибденитовых концентратов от этих примесей флотационным методом не представляется возможным из-за накопления в концентрате значительного количества флотореагентов, способствующих переходу в продукт компонентов, сульфидов цветных металлов и пустой породы.

В настоящее время к ферромолибдену предъявляются новые требования по плотности, скорости растворения в металле, температуре плавления и однородности слитка. Существенным недостатком ферромолибдена как ферросплава является повышенная плотность ($9...9,3 \text{ г/см}^3$), вследствие чего он оседает на подине печи или на дне ковша, что приводит к неоднородности (ликвации) стали по химическому составу. Кроме того, в слитках ферросплава содержание молибдена колеблется в пределах 50...70%, кремния - 0,2...5,0%, концентрации фосфора, серы и углерода отличаются в 1,4 раза, меди и цинка - в пять раз. Отрицательное влияние имеет также и малая скорость растворения в металле. Указанные факторы затрудняют получение стали с суженными границами содержания молибдена с целью экономии молибдена, а также стандартизации свойств стали различных плавок.

Традиционным методом получения дисилицида молибдена является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) из металлического молибдена и кремния, применяемый в настоящее время на Ванадзорском заводе высокотемпературных электронагревателей.

Существующие процессы получения молибденита высокой чистоты относятся к сложным технологиям и связаны с потерями металлов. Кроме того, они экономически неприемлемы в условиях Армении.

В настоящее время наиболее предпочтительным материалом в лазерной технике, акустооптических модуляторах, дефлекторах, в ядерных устройствах и т.д. является монокристалл молибдата свинца, что обусловлено его высокими физическими и оптическими свойствами. Монокристаллы молибдата свинца получают методами Я. Чохральского или П. Бриджмена при высоких температурах ($1100...1200^\circ\text{C}$), что приводит к нарушению стехиометрии, в результате чего они принимают желтоватый цвет.

Исходя из вышеизложенного, целью настоящей работы являются экспериментально-теоретическое и прикладное исследование комплексной переработки сульфидных концентратов молибдена. Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи:

- получение обожженного молибденового концентрата с содержанием меди и серы не более 0,08 и 0,05% для производства высококачественного ферромолибдена и других сплавов;
- разработка технологии получения дисульфида молибдена высокой чистоты для производства смазочных материалов;
- разработка технологии получения силицидов молибдена непосредственным синтезом из молибденитовых концентратов для производства высокотемпературных электронагревателей;
- разработка технологии получения молибдата свинца высокой чистоты для лазерной техники;
- разработка технологии применения сульфида кремния в качестве нового реагента для флотации окисленных медно-молибденовых руд;
- разработка технологии легирования и раскисления сталей дисилицидом молибдена.

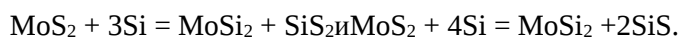
1. Нами исследована возможность очистки молибденитового концентрата от сопутствующих примесей 4...7%-й соляной кислотой, Т:Ж 1:2. Перед промывкой концентрат подвергали низкотемпературному обжигу при 673...723 К. Обжиг проводили в среде воздуха или воздуха и водяного пара. С увеличением температуры и продолжительности обжига содержание серы снижается. В этих условиях железо и медь окисляются, образуя сульфаты. Частично окисляется и молибден с образованием низших окислов. Выщелачивание осуществляли при комнатной температуре в течение 1...3 ч. Содержание меди в продукте снижается до 0,02%. Продукт подвергается дополнительному обжигу, в результате которого получается кондиционный огарок, соответствующий стандарту, и извлекается рений. Разработанная технология представлена в [1].

Разработана технологическая схема получения трехокси молибдена из молибденитовых концентратов методом СВС. По сравнению с традиционными методами, СВС имеет следующие преимущества: использование более дешевой внутренней химической энергии исходных компонентов вместо электрической энергии и энергии возгорания топлива, простота оборудования, большая скорость процессов, послойный характер выделения тепла, обеспечение экологических норм. Технологическая схема состоит из следующих операций: приготовление шихты (смешивание молибденитового концентрата и CaO), механическая активация шихты, уплотнение, СВС, выщелачивание 10% HCl, поглощение H₂S с помощью NaOH с образованием Na₂S, пригодного для флотации медно-молибденовых руд, окислительный обжиг с получением MoO₃ и Re₂O₇ [2].

2. Переработка молибденитового концентрата с целью получения дисульфида молибдена высокой чистоты включает следующие операции: 1) очистка концентрата от флотореагентов, которую проводят метасиликатом или карбонатом натрия. Затем пульпа подается в шаровую мельницу на доизмельчение для

вскрытия сростков MoS_2 с кварцем и других минералов. Для частичной очистки от кварца и шлама используют разницу плотности MoS_2 и шлама в водной среде с декантациями; 2) химическая обработка концентрата с целью глубокой отчистки MoS_2 от примесей. Влажный концентрат подвергают четырехкратному выщелачиванию: 1) 3%-й азотной кислотой при соотношении Т:Ж=1:2, температуре 50...60°C. Затем полученную пульпу фильтруют, осадок промывают водой 2...3 раза; 2) для очистки от двуокиси кремния влажный концентрат подвергают второму выщелачиванию 20%-й плавиковой кислотой при соотношении Т:Ж=1:1, температуре 60°C. При этом в раствор переходят кремнефтористая кислота, окислы меди, фосфора и другие примеси; 3) с целью удаления оставшихся окислов алюминия, сульфидов железа и халькопирита концентрат подвергают третьему выщелачиванию 7% -й азотной кислотой при соотношении Т:Ж=1:3, температуре 55...60°C; 4) на четвертом выщелачивании для удаления с поверхности минерала оставшейся трехокси молибдена и мизерного количества образующейся молибденовой кислоты осадок промывали 12% -ым раствором аммиака, а затем дистиллированной горячей водой. Таким образом, разработана технология получения дисульфида молибдена высокой чистоты [3 - 6].

3. В результате комплексного исследования разработана технология получения дисилицида молибдена непосредственным синтезом из сульфидных молибденовых концентратов для производства электронагревателей [7-9], которая состоит из следующих технологических операций: 1) очистка флотореагентов проводится так же, как на втором этапе; 2) влажный концентрат подвергают выщелачиванию 7...8 %- й азотной кислотой при соотношении Т:Ж = 1:3, температуре 50...60 °С. Затем полученную пульпу фильтруют, осадок промывают водой; 3) влажный концентрат сушат; 4) готовят шихту стехиометрического состава сульфидного концентрата и кремния, затем брикетируют; 5) синтез дисилицида молибдена печным методом или механоактивацией СВС в инертной и восстановительной средах протекает по реакции



Для получения лигатурных MoSi_2 нами исследовано взаимодействие сульфидного гидрометаллургического концентрата (марки КМГ-В, ГОСТ 212 -76) и кремния марки Кр00 (ГОСТ 2169-69). Гидрометаллургический концентрат марки КМГ-В содержит в %: Мо - не менее 58, SiO_2 - не более 0,3, As - не более 0,03, Sn - не более 0,01, P - не более 0,01, Cu - не более 0,01, Na_2O - не более 0,8, WO_3 - не более 2,0, Sb - не более 0,01, S - 15...25. Концентрат марки КМГ не содержит рения и представляет собой смесь MoS_2 , MoO_3 , MoO_2 и MoO_2SO_2 .

В случае СВС дисилицида молибдена при гидрометаллургическом концентрате нет необходимости механической активации, так как он горит в послойном режиме.

Исследования показали, что механизм получения дисилицида молибдена из дисульфида молибдена методом СВС многоступенчатый. Горение в этих системах имеет две химические стадии - восстановление дисульфида молибдена до металла и взаимодействие молибдена и кремния. Восстановление происходит с образованием сульфидов кремния.

Разработана технология получения дисилицида молибдена для легирования стали молибденом [10].

4. Разработана технология получения молибдата свинца высокой чистоты из полученных выщелачиванием растворов молибденитового концентрата 3% -й и 7% -й азотной кислотой.

Для получения молибдата свинца из водных растворов в качестве исходных соединений нами выбраны молибдат аммония и уксуснокислый свинец. Известные методы позволяют предварительно очистить полученный молибдат аммония в целом от меди, железа и других примесей. Для глубокой очистки раствора молибдата аммония от примесей в качестве комплексообразующего вещества применяли 0,1%-ный спиртовой раствор люмогаллиона (ЛГ ИРЕА). Очистка осуществлялась при $\text{pH}=7$, так как при более низких значениях pH люмогаллион образует комплексы с молибденом. Для сорбции образовавшихся комплексных соединений и избытка люмогаллиона применяют активированный уголь (предварительно отмытый от ионов железа и хлора). Для очистки уксуснокислого свинца были применены методы очистки люмогаллионом подобно очистке молибдата аммония.

Значение pH растворов молибдата аммония и уксуснокислого свинца доводили до 5. Раствор уксуснокислого свинца подогревали, помещали в колбу, после чего приливали по каплям раствор молибдата аммония, осадок промывали, перемешивая его, фильтровали и сушили при температуре $160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Продукт имел следующий химический состав: $\text{PbMoO}_4 \geq 99,99$; $\text{Fe} = 1 \cdot 10^{-4}$; $\text{Co} = 3 \cdot 10^{-4}$; $\text{Ni} = 3 \cdot 10^{-5}$; $\text{Mn} = 1 \cdot 10^{-4}$; $\text{Cr} = 3 \cdot 10^{-5}$ [11-13].

5. Разработана технология применения сульфида кремния в качестве нового реагента для флотации окисленных медно-молибденовых руд.

Одной из важных проблем горнодобывающих предприятий является переработка окисленных труднообогатимых и смешанных руд. Часть руды из-за высокой степени окисления вообще не подвергается обогащению. Наиболее перспективным методом переработки этих руд является перевод окисленных форм цветных металлов (оксиды, карбонаты, сульфаты, молибдаты и др.) в легкообогатимые сульфидные формы. Эффективным решением данного метода является использование в процессах измельчения руды сульфидных систем SiS_2 , $\text{Na}_2[\text{SiS}_3]$ с целью улучшения флотационных свойств. Сущность метода заключается в том, что предварительная сульфидизация поверхности минералов обеспечивает

высокую степень обогащения медных минералов. Доказано, что устойчивые стабильные сульфиды меди образуются в среде, начиная от кислой до нейтральной. В настоящее время используемые в производстве водные растворы Na_2S имеют щелочную реакцию из-за гидролиза, в связи с чем сульфиды меди получают неустойчивыми и во время флотации разлагаются. При SiS_2 образуется слабая кислая среда, а при $\text{Na}_2[\text{SiS}_3]$ изменений почти не происходит. Исследован процесс флотации сульфидированных медных руд. Разработана технология переработки окисленных медных минералов Техутского медно-молибденового месторождения, которая включает поверхностную сульфидизацию минералов меди в процессе измельчения и флотацию [14-16].

6. Разработана технология легирования и раскисления сталей дисилицидом молибдена. Исследования показали, что, несмотря на тугоплавкость, MoSi_2 хорошо растворяется в жидком железе, стали, никеле, кобальте. Дисилицид молибдена не окисляется даже в токе кислорода при температуре 1973 К.

Результаты лабораторных исследований были проверены в опытных заводских условиях. Выполнен комплекс исследований с промышленной апробацией полученных результатов на мартеновской и электродуговой печах на ВМЗ “Красный Октябрь”.

Подготовку печи, шихтовку, плавление осуществляли в соответствии с действующей технологической инструкцией ТИ-132-М-1-81 и ТИ-132-ЭС2-25-84 по производству теплоустойчивой трубной заготовки. Сравнительные плавки, легированные молибденом в печи и в ковше, проводили на низколегированных сталях марок 12Х1МФ, 15ХМ, 15Х1М1Ф, 40ХН2МА и др. С целью определения степени усвоения молибдена исследования проводили в четыре этапа: MoSi_2 на первом этапе вводили под чугун, в завалку; на втором этапе - в период доводки; на третьем этапе - в период раскисления в печи и в ковше; выплавку опытных плавки проводили также в 200 - тонной электропечи; на четвертом этапе MoSi_2 вводили после скачивания окислительного шлака и в восстановительный период плавки с целью легирования металла молибденом и одновременного раскисления металла. Результаты заводских испытаний показали, что степень усвоения молибдена расплавом практически составляет ~ 100%, неоднородность по молибдену отсутствует. Полученные результаты позволили перейти к проведению периода доводки (рафинирования) без корректировки содержания молибдена по ходу плавки и вводу в ковш всего необходимого его количества. При этом сокращается продолжительность плавки, уменьшается угар легирующих элементов и повышается производительность сталеплавильных печей.

Оценку неметаллических включений производили под микроскопом путем сравнения с эталонными шкалами при просмотре площади нетравленных шлифов. Макроструктуру проката в соответствии с ГОСТ 10243-75 контролировали в

пробах, отобранных из головной, средней и нижней частей проката слитков второго сифона. Результаты микро- и макроконтроля, а также механические свойства полученных сталей полностью удовлетворяют требованиям стандарта [17-19].

Выводы. Разработана технология комплексной переработки сульфидных концентратов молибдена, на основе которой возможно получение обожженного молибденового концентрата с низким содержанием меди и серы; дисульфида молибдена высокой чистоты для получения смазочного материала; дисилицида молибдена непосредственным синтезом из сульфидных молибденовых концентратов; молибдата свинца высокой чистоты и стехиометрического состава для выращивания монокристаллов; сульфидов кремния для флотации медно-молибденовых руд; лигатурных материалов для легирования стали молибденом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Աղբալյան Ս.Գ., Հովսեփյան Ա.Հ., Իսրայելյան Ս.Մ., Սաֆարյան Վ.Հ.** Մոլիբդենիտային խտանյութերը գունավոր մետաղներից մաքրման և դրանից տեխնիկական մաքրությամբ մոլիբդենի եռօքսիդի ստացման տեխնոլոգիայի հետազոտումը // Հայաստանի ճարտարագիտական ակադեմիայի Լրաբեր. - 2010.- Հ. 7, № 3.- էջ 494 -498:
2. **Овсебян А.О., Тадевосян Д.Р., Лорян В.Э.** Получение трехокси молибдена из молибденитового концентрата методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Химия и химическая технология.- Ташкент, 2014.- № 2 [44].- С. 2-5.
3. **Овсебян А.О., Айрапетян Г.М., Минасян С.А.** Технология получения порошка дисульфида молибдена высокой чистоты // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер.ТН.- 2004.- Т.57, №2.- С. 256-259.
4. ՀՀ գյուտի արտոնագիր № 2335А. Մոլիբդենի երկսուլֆիդի ստացման եղանակ/**Ա.Հ. Հովսեփյան, Հ.Ռ. Հովսեփյան, Ս.Մ Իսրայելյան.** – 25.11.2009:
5. **Հովսեփյան Ա.Հ., Իսրայելյան Ս.Մ.** Մոլիբդենիտային խտանյութերից մաքուր և դիսսպերս մոլիբդենի դիսուլֆիդի ստացման տեխնոլոգիայի մշակումը // ՀՀ ԳԱԱ և ՀՊՃՀ Տեղեկագիր: ՏԳ սերիա.- 2009.- Հատ. 62, № 2.- էջ 155-162:
6. **Овсебян А.О.** Технология получения дисульфида молибдена высокой чистоты // Химия и химическая технология.- Ташкент, 2010.- № 3 [29].- С. 19-22.
7. Մոլիբդենիտային խտանյութերից մոլիբդենի դիսիլիցիդի ստացման տեխնոլոգիայի հետազոտումը / **Ս.Գ. Աղբալյան, Ա.Հ. Հովսեփյան, Ա.Ս. Գրիգորյան** և այլն. // ՀՀ ԳԱԱ և ՀՊՃՀ Տեղեկագիր: ՏԳ սերիա.- 2008.- Հատ. 61, №2.- էջ 237-242:
8. **Овсебян А.О., Тадевосян Д.Р.** Технология получения силицида молибдена из молибденитовых концентратов методом СВС // Сборник материалов III Межд. конф. по химии и химической технологии. – Ереван, 2013.- С. 281-282.
9. **Орданян С.С., Вихман С.В., Нагаева Ю.В., Овсебян А.О.** О взаимодействии в системах $\text{MoSi}_2 - \text{Me}^{\text{IV}}\text{B}_2$ // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер.ТН.- 2011.- Т. 64, №1.- С. 36-43.

10. **Овсебян А.О., Тадевосян Д.Р.** Исследование процесса получения дисилицида молибдена из молибденитовых концентратов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Вестник ГИУА (Политехник). Серия “Металлургия, материаловедение, недропользование”. - 2014.- Вып. 17, № 1.- С. 19 -25.
11. **Աղբալյան Ս.Գ., Հովսեփյան Ա.Հ., Հարությունյան Ս.Ա.** Մոլիբդենիտային խտանյութերից հիդրոմետալուրգիական եղանակով կապարի մոլիբդատի ստացման տեխնոլոգիայի մշակումը // ՀՀ ԳԱԱ և ՀՊՃՀ Տեղեկագիր: ՏԳ սերիա.- 2012.- Հատ. 65, №3.- էջ 246-253:
12. **Աղբալյան Ս.Գ., Հովսեփյան Ա.Հ., Հարությունյան Ս.Ա.** Ցածր ջերմաստիճաններում կապարի մոլիբդատի մոնոքլորիդի աճեցման տեխնոլոգիայի մշակումը սիլիկաժելի միջավայրում // ՀՀ ԳԱԱ և ՀՊՃՀ Տեղեկագիր: ՏԳ սերիա.- 2013.-Հատ. 66, №3.- էջ 199-204:
13. **Aghbalyan S., Hovsepyan A., Petrosyan A., Harutyunyan S.** The developmetechonology for obtaining high purity lead molybdate from molybdenite concentrates // Research journal of the ooi Junior Academy, Transactions on.- USA, Lousiana, 2014.- Vol. 14, N 1.- P. 55-63.
14. **Мелконян М.Г., Овсебян А.О.** Сульфидизация окисленных медно-молибденовых минералов (на примере Техутского месторождения РА) // Химическая технология: Сборник тезисов докладов Международной конференции ХТ’12.- М., 2012.- Т.4.- С. 181-183.
15. **Овсебян А.О., Мелконян М.Г.** Сульфидизации окисленных минералов меди на стадии измельчения // Химия и химическая технология.- Ташкент, 2013.- № 2 [40].- С. 2-5.
16. **Овсебян А.О., Мелконян М.Г., Тадевосян Д.Р.** Исследование процесса сульфидизации окисленных минералов меди на стадии измельчения // Вестник ГИУА (Политехник). Серия “Металлургия, материаловедение, недропользование”. - 2013.- Вып. 16, № 1.- С.30-35.
17. А.с. № 1027260 (СССР). Лигатура для производства сплавов на основе железа и никеля / **А.О. Овсебян, С.С. Караханян, Р.М. Киракосян и др.** // Открытия. Изобретения.- М., 1983.- № 25.
18. **Овсебян А.О., Кулиш В.П., Клиот С.А.** Использование молибденсодержащих отходов электронагревателей при выплавке стали // Сталь. - М., 1985.- № 2.- С.30-32.
19. **Овсебян А.О.** Тепловые процессы, протекающие при легировании и раскислении стали дисилицидом молибдена // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер.ТН.- 1998.- Т.51, №1. - С. 40-44.

Институт общей и неорганической химии им. М.Г. Манвеляна НАН РА. Материал поступил в редакцию 12.03.2015.

Ա.Հ. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ
ՍՈԼԻԲԻԴՆԻ ՍՈԼԻՖԻԴԱՅԻՆ ԽՏԱՆՅՈՒԹԵՐԻ ՀԱՄԱԼԻՐ ՎԵՐԱՄՇԱԿՈՒՄԸ

Կատարվել են մոլիբդենի սուլֆիդային խտանյութերի համալիր վերամշակման փորձա-
րարա-տեսական և կիրառական հետազոտություններ, որոնց արդյունքում ստացվել է թրծված
մոլիբդենային խտանյութ, որում պղնձի ու ծծմբի պարունակությունը կազմել է համապատաս-
խանաբար ոչ ավելի 0,08 և 0,05%, բարձր մաքրությամբ մոլիբդենի դիսուլֆիդ՝ քսուքային
նյութերի համար, մոլիբդենի դիսիլիցիդ՝ մոլիբդենի սուլֆիդային խտանյութերից անմիջական
սինթեզի մեթոդով, բարձր մաքրությամբ և ստեխիոմետրական բաղադրությամբ կապարի մո-
լիբդատ՝ միաբյուրեղի աճեցման համար, լեզիրող նյութեր՝ պողպատները մոլիբդենով լեզիրելու
համար, սիլիցիումի սուլֆիդ՝ պղնձա-մոլիբդենային հանքանյութերի ֆլոտացման համար:

Առանցքային բառեր. սուլֆիդային խտանյութ, սինթեզ, մոլիբդենի դիսուլֆիդ և դիսիլի-
ցիդ, կապարի մոլիբդատ, սիլիցիումի սուլֆիդ:

A.H. HOVSEPYAN
COMPLEX PROCESSING OF SULPHIDE CONCENTRATES OF
MOLYBDENUM

Experimental-theoretical and applied investigations of complex processing of sulphide
concentrates of molybdenum are carried out, as a result of which, roasted molybdenum
concentrate accordingly with a content of copper and sulphur not more than 0,08 and 0,09%;
disulphide of molybdenum with high purity for preparing lubricants; disilicide of molybdenum
with a method of direct synthesis from sulphide concentrates of molybdenum; lead molybdate
with high purity and stoichiometric composition for growing single crystals; ligature materials
for alloying steel with molybdenum; sulphides of silicon for the flotation of copper-molybdenum
ores are obtained.

Keywords: sulphide concentrate, synthesis, disilicide and disulphide of molybdenum,
lead molybdate, sulphide of silicon.

Ռ.Ա. ՌԱՖԵԱՆ, Ռ.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, Ռ.Գ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

**ԳՏՏ ԿՈՄՊԼԵՍՈՐ ՆԵՐՇՈՎՈՂ ՕԴԻ ԶՐԱՅԻՆ ՄՇՈՒՇԱՊԱՏՄԱՄԲ ՀՈՎԱՑՄԱՆ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԻՐԱՌՄԱՆ ՏԵԽՆԻԿԱՏՆԵՍԱԿԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿ
(ԵՐՋԷԿ-Ի ՕՐԻՆԱԿՈՎ)**

ԵրՋԷԿ-ի համակցված շոգեգազային էներգաբլոկի օրինակով դիտարկվել է գազատուրբինային տեղակայանք մատուցվող օդի հովացման ջրային մշուշապատման համակարգի տեխնիկատնտեսական շահավետությունը:

Առանցքային բառեր. գազատուրբինային տեղակայանք, ջրային մշուշապատում, խոնավ հովացման համակարգ, համակցված ցիկլ, ԵրՋԷԿ:

Ջրային մշուշապատման համակարգը հանդիսանում է գազատուրբինային տեղակայանք մատուցվող օդի հովացման ամենատարածված միջոցը: Համակարգի աշխատանքի ժամանակ ծախսվում են էլեկտրական էներգիա և քիմիապես մաքրված ջուր, որը պատրաստվում է կայանի քիմիական արտադրամասում, ինչպես նաև հավելյալ վառելիք: Այդպիսի որևէ համակարգի տարեկան շահագործման ծախսերի համար կարելի է գրել՝

$$3 = \sigma * K + \Theta, \quad (1)$$

որտեղ 3-ն տարեկան ծախսերն են, σ -ն՝ կապիտալ ներդրումների ետգնման գործակիցը, K-ն՝ կապիտալ ներդրումները, Θ -ն՝ տարեկան շահագործման ծախսերը:

Հովացման համակարգի ստեղծած հավելյալ եկամուտը (II) կլինի դրա աշխատանքով պայմանավորված ավել արտադրված էլեկտրական էներգիայի վաճառքից գոյացած եկամուտը:

Հովացման ջրային մշուշապատման համակարգի տեղակայման արժեքը հաշվարկվում է ըստ Էքսպերտային գնահատման արժեքի, որը կազմում է 4 \$/կՎտ տեղակայված հզորություն՝ ըստ նախագծային հզորության [1]: Այսինքն, ԵրՋԷԿ-ի դեպքում այդ հզորությունը կազմում է 172000 կՎտ, որը հանդիսանում է միայն ԳՏՏ-ի հզորությունը, քանի որ հովացման համակարգի ձևը կախված չէ ԳՏՏ-ի համակցված կամ պարզ ցիկլով աշխատելու փաստից: Հետևաբար՝ հովացման համակարգի տեղակայման արժեքը կլինի $251,1 \cdot 10^6$ ղր:

$$K = 251,1 \cdot 10^6 \text{ ղր} :$$

Տարեկան շահագործման ծախսերի և հավելյալ եկամուտների համար կարող ենք գրել՝

$$\Theta = \Theta_{\text{էլ}} + \Theta_{\text{ջ}} + \Theta_{\text{վ}}, \quad (2)$$

$$\Theta_{\text{էլ}} = W_{\text{տ}} * c_{\text{էլ}} * \tau, \quad (3)$$

$$\Theta_{\text{ջ}} = G_{\text{ջ}} * c_{\text{ջ}} * \tau, \quad (4)$$

$$\Theta_{\text{վ}} = G_{\text{հ.վ.}} * c_{\text{վ}} * \tau, \quad (5)$$

$$\Pi = \Pi_{\text{էլ}}, \quad (6)$$

$$\Pi_{\text{էլ}} = \Delta N * c_{\text{էլ}} * \tau, \quad (7)$$

որտեղ τ -ն հովացման համակարգի կիրառման տևողությունն է, ΔN -ն՝ հովացման համակարգի գործունեության հետևանքով ավելացած հզորության չափը (*կՎտ*), $c_{\text{էլ}}$ -ն՝ էլեկտրական էներգիայի ինքնարժեքը (*դր*), $c_{\text{ջ}}$ -ն՝ քիմիապես մաքրված ջրի ինքնարժեքը (*դր*), $c_{\text{վ}}$ -ն՝ վառելիքի գինը (*դր*), $W_{\text{տ}}$ -ն՝ հովացման տեղակայանքի հզորությունը (*կՎտ*), $G_{\text{ջ}}$ -ն՝ հովացման համար ծախսվող ջրի քանակությունը, $G_{\text{հ.վ.}}$ -ն՝ հավելյալ ծախսվող վառելիքի քանակը:

Քիմիապես աղազրկված ջրի ինքնարժեքը հաշվարկենք Հրազդանի 5-րդ էներգաբլոկում տեղակայված քիմիական արտադրամասի աղազրկման տեղակայանքի տվյալների հիման վրա: Քանի որ ԵրՋԷԿ-ից առաքվող էլեկտրական էներգիայի սակագնի մեջ արդեն իսկ ներառված է արտադրվող քիմիապես աղազրկված ջրի ինքնարժեքը, և որում ներառված են քիմիական արտադրամասում տեղակայված սարքավորումների կապիտալ ներդրումները, ամորտիզացիոն ծախսերը և այլն, ուստի խոնավ հովացման համակարգի համար օգտագործվող ջրի ինքնարժեքը որոշելու համար անհրաժեշտ է հաշվարկել միայն պահանջվող հավելյալ ջրի արտադրության վրա ծախսվող նյութերի և հում ջրի արժեքների հետ կապված ծախսերը:

Այսպես, ըստ Հրազդանի 5-րդ էներգաբլոկում տեղակայված ջրի աղազրկման տեղակայանքի անձնագրային տվյալների՝ 1000 մ^3 քիմիապես աղազրկված ջուր ստանալու համար անհրաժեշտ է 1650 մ^3 հում ջուր: Որպես հում ջուր Երևանի ՋԷԿ-ն օգտագործում է խմելու ջուր, որի արժեքը, ըստ «ԵրևանԶուր» ընկերության սահմանած սակագնի, կազմում է 153,85 $\text{դր}/\text{մ}^3$ [2]: Պահանջվող մյուս բաղադրիչների քանակները և արժեքները ներկայացված են աղ.1 –ում:

Աղյուսակ 1

Քիմիապես աղազրկված ջրի (ՔԱՋ) պատրաստման համար անհրաժեշտ ռեագենտների անվանումները, պահանջվող քանակությունները և գները

	ՔԱՋ արտադրության համար պահանջվող ռեագենտի անվանումը	Քանակությունը		Ռեագենտի միավորի գինը		Ռեագենտի գինը 1 մ ³ ՔԱՋ-ի արտադրության համար	
		չափ. միավոր	մեծությ.	չափ. միավոր	մեծությ.	չափ. միավոր	մեծությ.
1	Հիպոքլորիդ	գր/մ ³	9,720	\$ / կգ	0,660	դր/մ ³	2,4
2	Լիմոնաթթու	գր/մ ³	23,600	\$ / կգ	3,240	դր/մ ³	28,3
3	Նատրիումի հիդրոքսիդ, պինդ	գր/մ ³	21,400	\$ / կգ	1,800	դր/մ ³	14,3
4	Նատրիումի մետաբիսուլֆիտ	գր/մ ³	1,530	\$ / կգ	3,600	դր/մ ³	2,0
5	Կոագուլյանտ՝ ալյումինի պոլիոքսիքլորիդ	գր/մ ³	58,200	\$ / կգ	2,700	դր/մ ³	58,1
6	Կայունացուցիչ Purotech R0107	գր/մ ³	2,920	€ / կգ	3,444	դր/մ ³	5,3
7	Քարտրիջ 2.5" x 40" 5 մկմ	հատ/մ ³	0,00067	\$ / հատ	48,00	դր/մ ³	11,9

Աղ.1-ում բերված տվյալների և հում ջրի գնի հիման վրա հաշվարկների արդյունքում 1 մ³ քիմիապես աղազրկված ջրի համար ստանում ենք 376,2 դր/մ³ արժեքը:

Մտ-ի համար կարելի է գրել՝

$$W_{\text{մ}} = k_2 \frac{PG_2}{\eta_{\text{մ}} \eta_2}, \quad (8)$$

որտեղ P-ն ջուրը մղող պոմպի զարգացրած ճնշումն է, $\eta_{\text{մ}}$, G₂-ն՝ ջրի ծախսը, մ³/վ-ով, k₂-ն՝ շարժիչի պաշարի գործակիցը, $\eta_{\text{մ}}$ -ն և η_2 -ն՝ համապատասխանաբար պոմպի և շարժիչի օ.գ.գ.-ները:

Պոմպի զարգացրած ճնշումը հովացման համակարգի նորմալ աշխատանքի համար հավասար է 20 ՄՊա: $k_{պ}$ -ն ընդունում ենք հավասար 1,2-ի: $\eta_{պ}=85\%$, $\eta_2=86\%$: G_2 -ն հաշվարկվում է տվյալ մթնոլորտային պայմանների դեպքում օդի զանգվածային խոնավապարունակության միջոցով՝ $d_{դօ}$: Նախ հաշվվում է առանց հովացման դեպքի համար $d_{դօ}$ -ն և այն բազմապատկվում այդ դեպքում ԳՏՏ կոմպրեսորում օդի զանգվածային ծախսով: Հովացման համակարգի աշխատանքի դեպքում կոմպրեսորի մուտքում օդի հարաբերական խոնավությունը հասնում է 100%-ի, և արդեն հովացած օդի դեպքում հաշվարկելով $d_{դօ}$ -ն՝ այն բազմապատկում ենք այդ դեպքում օդի զանգվածային ծախսով:

ԵրՋԷԿ-ի համար բնական գազի սակագինը 88,75 $\eta p/մ^3$ է, իսկ առաքվող էլեկտրական էներգիայի ինքնարժեքը 8,04 $\eta p/կՎտժ$ [2]: Այս բոլորը հաշվի առնելով, աղ.2 և 3-ում բերված միջին ջերմաստիճանի և տևողականության դեպքում ստանում ենք՝ $\Theta=2,38 \cdot 10^6 \eta p$, իսկ $\Pi=85,7 \cdot 10^6 \eta p$:

Աղյուսակ 2

Միջին ամսական ջերմաստիճանների տևողություններն ըստ ամիսների Երևան քաղաքի համար [3]

Ջերմաստիճան		Ամիսներ								
-ից	մինչև	3	4	5	6	7	8	9	10	11
15,1	20	0,2	6,7	16,8	7,9	0,6	0,8	12	8,5	0,08
20,1	25	0	0,3	7	17,4	12,9	13,9	14,1	0,5	0
25,1	30	0	0	0	4,1	16,4	15,9	1,5	0	0
30,1	35	0	0	0	0	1	0,4	0	0	0

Աղյուսակ 3

Միջին ամսական ջերմաստիճանների տևողություններն ըստ ժամերի Երևան քաղաքի համար

Միջին ջերմաստիճան	Ժամեր									
	3-րդ ամիս	4-րդ ամիս	5-րդ ամիս	6-րդ ամիս	7-րդ ամիս	8-րդ ամիս	9-րդ ամիս	10-րդ ամիս	11-րդ ամիս	Գույն
17,5	-	160,8	403,2	189,6	14,4	19,2	288	204	-	1279,2
22,5	0	7,2	168	417,6	309,6	333,6	338,4	12	0	1586,4
27,5	0	0	0	98,4	393,6	381,6	36	0	0	909,6
32,5	0	0	0	0	24	9,6	0	0	0	33,6

Աղ.4-ում ներկայացված են աղ.3-ում բերված դիտարկվող միջին ջերմաստիճանների դեպքում վերը նկարագրված հաշվարկների արդյունքները:

Աղյուսակ 4

Ջրային մշուշապատման համակարգի տեխնիկատնտեսական ցուցանիշները ԵրՋԷԿ-ի համար

Առանց հովացման		հովացմամբ		τ, ժամ	G _{ջուր} , կգ /վ	N _{պոմպ} , կՎտ	ΔN, կՎտ	3, ՊՊ	Π, ՊՊ	Π-3, ՊՊ
t, °C	φ, %	t, °C	φ, %							
17,5	49,9	11,5	100	1279,2	1,27	41,9	8374,5	2812272	86130221	82006712
22,5	49,9	15,6	100	1586,4	4,66	153,6	8610	12179761	109816289	91677056
27,5	49,9	19,7	100	909,6	1,67	55,9	9362	2626034	68466142	64594720
32,5	49,9	23,9	100	33,6	1,94	63,9	10150	110641	2741883	2578699

Ինչպես երևում է աղ.4-ից, ամբողջ տարվա ընթացքում հովացման համակարգի 3808,8 ժամ աշխատանքի ընթացքում ծախսվում է $17,7 \cdot 10^6$ ՊՊ հավելյալ վառելիքի, աղագրկված ջրի և պոմպի ծախսած էլեկտրական էներգիայի համար, իսկ ավելացած հզորության հաշվին արտադրվում է $267,1 \cdot 10^6$ ՊՊ արժողությամբ էլեկտրաէներգիա: Ուստի տարեկան հավելյալ եկամուտի և ծախսերի տարբերությունը կազմում է $249,4 \cdot 10^6$ ՊՊ:

Կատարենք տարեկան շահագործման ծախսերի և հավելյալ եկամուտի տարբերության հաշվարկ երկու տարբերակով՝ առաջինում ընդունելով σ-ն հավասար 0,121-ի, որը համապատասխանում է 8,3 ետգնման տարիներին, որը ընդունված գործակից է էներգետիկական օբյեկտների համար: Երկրորդ դեպքում հաշվարկենք տարեկան եկամուտը և գտնենք σ-ի նվազագույն արժեքը, այսինքն՝ կապիտալ ներդրումների ետգնման նվազագույն ժամկետը: σ-ի 0,121 արժեքի համար՝

$$3=0,121 \cdot 251,1 \cdot 10^6 + 17,7 \cdot 10^6 = 47,9 \cdot 10^6 \text{ ՊՊ,}$$

իսկ

$$\Pi = 267,1 \cdot 10^6 \text{ ՊՊ:}$$

$$\text{Ուստի՝ } \Pi - 3 = 219,1 \cdot 10^6 \text{ ՊՊ:}$$

Այսինքն՝ տարեկան մաքուր հավելյալ եկամուտը կկազմի $219,1 \cdot 10^6$ ՊՊ:

Երկրորդ դեպքի համար հաշվարկենք 3-ն՝ առանց կապիտալ ներդրումների ետգնման մասնաբաժնի: Այն հավասար կլինի $17,7 \cdot 10^6$ ՊՊ, իսկ Π-ն կլինի հավասար կլինի $267,1 \cdot 10^6$ ՊՊ: Եվ $\Pi - 3 = 249,4 \cdot 10^6$ ՊՊ: Եթե K-ն բաժանենք (Π-3)-ի վրա, կստանանք կապիտալ ներդրումների ետգնման նվազագույն ժամկետը՝ 1,007 տարի, կամ σ=0,99-ի:

Եզրակացություն. Հաշվարկների արդյունքները ցույց են տալիս, որ Երևան քաղաքի պայմաններում ԵրԶԷԿ-ի գազատուրբինային տեղակայանքի մուտքում օդի հովացման ջրային մշուշապատման համակարգի տեղադրումը տնտեսապես շահավետ է, և այդպիսի համակարգի ետգնման ժամկետը կազմում է 1,007 տարի:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. GT inlet-air cooling boosts output on warm days to increase revenue By Dharam V Punwani, Avalon Consulting Inc and Ray Pasteris, Strategic Energy Services Inc.
2. ՀՀ Հանրային ծառայությունները կարգավորող հանձնաժողով. www.psrc.am
3. Справочник по климату СССР. Выпуск 16: Армянская СССР. Часть 4.-Л., 1969.-195 с.

ՀԱՊՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 12.02.2015:

Ր.Ա. ՐԱԲՅԱՆ, Վ.Յ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, Ր.Գ. ԽԱՇԱՏՐՅԱՆ

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОСТУПАЮЩЕГО В КОМПРЕССОР ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ВОЗДУХА ВОДЯНЫМ ТУМАНООБРАЗОВАНИЕМ (НА ПРИМЕРЕ ЕрТЭЦ)

Исследована технико-экономическая эффективность системы охлаждения поступающего в компрессор ГТУ воздуха водяным туманообразованием на основе парогазового энергоблока ЕрТЭЦ.

Ключевые слова: газотурбинная установка, водяное туманообразование, система мокрого охлаждения, комбинированный цикл, ЕрТЭЦ.

R.A. RAFYAN, V.Z. MARUKHYAN, R.G. KHACHATRYAN

TECHNICAL AND ECONOMIC CALCULATIONS OF GT COMPRESSOR INTAKE AIR COOLING SYSTEM BY FOGGING (ON YCCPP EXAMPLE)

The technical and economic efficiency of GT compressor air intake cooling system by fogging on the basis of the gas-steam power unit of YCCPP is investigated.

Keywords: gas turbine plant, water fogging, wet cooling system, combined cycle, YCCPP.

А.С. АКАРМАЗЯН

**МЕТОДОЛОГИЯ МОНИТОРИНГА ГЕНЕРАТОРОВ МАЛЫХ ГЭС:
АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

Высокая степень изношенности оборудования ГЭС может привести к увеличению частоты аварий, риска техногенных катастроф и другим серьезным сбоям в энергообеспечении. Во избежание любых сбоев во время эксплуатации необходимо проводить техобслуживание, основанное на данных о состоянии машины, а также мониторинг важных параметров, характеризующих состояние машины. Существующие коммерческие системы невыгодны, многие из них из-за дороговизны не получили широкого применения при обслуживании электрических машин малой мощности. С этой точки зрения, недорогие системы, основанные на подходящих алгоритмах и группировке правильно подобранных датчиков и устройств, со временем становятся необходимостью. Представлены существующие методы мониторинга. Разработаны этапы новой методологии оценки состояния генераторов МГЭС и определены требования к системе мониторинга и автоматического управления.

Ключевые слова: мониторинг, гидрогенератор, системы автоматизации, возобновляемая энергия.

Производство электроэнергии, основанное на являющейся возобновляемым энергоресурсом гидроэнергетике, для стран, лишенных топливно-энергетических ресурсов, по существу, является одним из приоритетных направлений развития энергетики.

В области управления ГЭС даже незначительное улучшение может привести к существенной разнице в расходах и доходах. Важной составляющей ГЭС считается гидрогенератор. Принцип строения генераторов схож, а их недостатки во время эксплуатации проявляются одинаковым образом. Известно, что генераторы имеют минимальное время вращения ротора и статора и служат 20...30 лет, до перемотки [1]. Исходя из сказанного и исследуя информацию об основных показателях станций, предоставленную армянскими компаниями, эксплуатирующими малые ГЭС (МГЭС), следует отметить, что многие электрические машины достигли критического состояния износа [2].

Исследования, связанные со сроками эксплуатации генераторов, потенциалом пригодности составляющих систем машин, онлайн системами сбора и обработки данных в реальном времени, а также с автоматизацией электрических машин, со временем становятся все более актуальными, что обусловлено сложностью определения изношенности агрегата в рабочем режиме и анализа изношенности в стационарном режиме, а остановка работы агрегата приводит к потере времени,

ресурсов и возможной производимой продукции. Эта область исследований периодически расширяется, их конечной целью является создание такой системы мониторинга, которая максимально удовлетворит соотношению цена-качество, существенно сократит расходы на эксплуатацию и обслуживание, уменьшит количество аварий.

На разные компоненты гидрогенератора может оказываться ряд воздействий: электрическое, термическое, механическое, воздействие окружающей среды и так называемые "групповые воздействия". Для оценки состояния гидрогенераторов важно различать коренные причины проблем и виды неисправностей. В таблице обобщены наиболее часто встречающиеся коренные причины и виды неисправностей гидрогенератора.

Таблица

Коренные причины и виды неисправностей гидрогенератора

Коренные причины	Виды неисправностей
• Ошибки в проектировании или производстве • Неполноценное сырье или поврежденный компонент • Ошибки в установке • Ненадлежащее обслуживание или неправильная эксплуатация • Состояние внешней среды • Превышение скорости • Перенагрузка • Малоцикловая усталость или ударные нагрузки • Высокоцикловая усталость или слишком большая вибрация • Неисправность в компоненте • Перегрев обмотки • Перегрев подшипников • Слишком большое диэлектрическое воздействие (постоянное или временное) • Мусор или загрязнение • Коррозия	• Неисправности изоляции ядра • Неисправности изоляции обмотки статора • Неисправности изоляции обмотки ротора • Неисправности щеток • Неисправности контактных колец • Неисправности в коммутаторе • Неисправности в подшипниках • Неисправности в механической целостности ротора • Неисправности в механической целостности статора

Для того, чтобы обнаружить возможные неисправности в машине, необходимо произвести мониторинг ряда параметров, дающих качественную оценку

состояния машины. К классу параметров, характеризующих реальное состояние гидроагрегатов, относятся номинальное напряжение и ток, мощность, напряжение возбуждения, температура обмотки и якоря, скорость и ускорение статора, частичные разряды, температура подшипников, уровень масла в подшипниках и ряд других параметров, влияющих на состояние системы охлаждения [3]. Исследуя существующие методы и изучаемые в них параметры, можно классифицировать системы мониторинга следующим образом (рис. 1).



Рис. 1. Классификация методов мониторинга гидрогенератора

Системы мониторинга обычно разрабатываются для специфических целей и специфических машин. В частности, гидрогенератор мощностью 35 МВт для мониторинга может иметь датчик магнитной индукции, температуры, а также тока ротора, напряжения ротора, напряжения сети, ускорения вибрации – всего 51 сигнал.

Существует ряд методов мониторинга. К числу встроенных методов относится сенсорная технология, вмонтированная в ротор. Непрерывно подвергаются мониторингу воздушный зазор между двумя осями, температура ядра статора (используется ИК сенсор), месторасположение частичных разрядов, плотность магнитного потока. Методы мониторинга температуры используются для обеспечения соответствующей температуры различных компонентов машины, предписанной стандартами [4].

Выделяют три подхода к мониторингу температуры (см. рис. 2.).

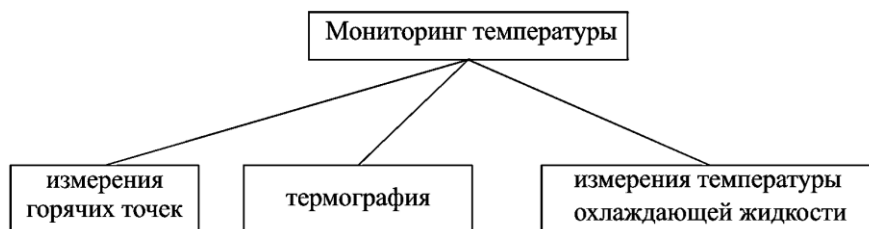


Рис. 2. Классификация методов мониторинга температуры

Первый использует точечное измерение температуры с использованием сенсоров. Этот метод очень прост и экономически выгоден. Однако он имеет недостаток, заключающийся в том, что возможно упустить локальные точки нагрева, и поскольку сенсоры зачастую сделаны из металла, они не могут быть расположены в местах с высокой температурой. Второй подход использует термографию с целью определения температуры движущихся частей, в которых трение играет важную роль. Детализированное тепловое изображение машины, которое ясно выявляет все точки нагрева, может быть получено только с помощью специального дорогостоящего измерительного оборудования. Этот подход зачастую используется для проверки состояния подшипников и гарантирования, что они надлежащим образом смазаны. Последний подход предлагает общий обзор эффективности охлаждающей системы машины посредством измерения температуры охлаждающей жидкости. Этот подход также может быть использован для определения степени загруженности машины. Его основной недостаток заключается в том, что он не предоставляет достаточной информации для точной диагностики грозящей аварии.

Методы мониторинга степени механических вибраций нацелены на гарантирование того, что возбуждение опорных конструкций электрической машины, вызываемое электромагнитными полями и крутящим моментом, на натуральных или других частотах не превышает установленных стандартов.

Выделяют два основных подхода к мониторингу механических вибраций, как показано на рис. 3.

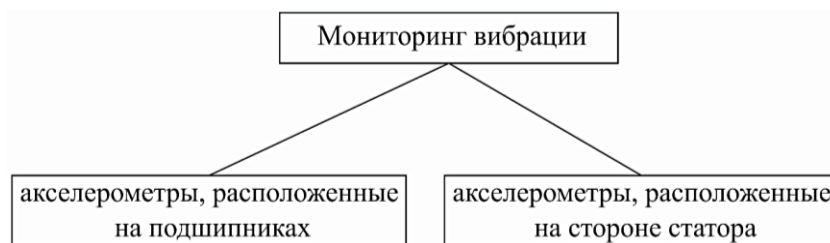


Рис. 3. Классификация систем мониторинга механических вибраций

Поперечное движение может быть обнаружено при использовании сенсоров вибрации, расположенных на корпусе машины. Акселерометры, расположенные на подшипниках (для обнаружения высоких частот), или датчики приближения, расположенные рядом с подшипниками (для обнаружения низких частот), также могут быть использованы, однако установка системы мониторинга сложна для реализации в производстве. По этой причине описываемый метод предлагает располагать акселерометры на стороне статора машины, тем самым общие поперечные движения могут быть обнаружены в диапазоне $0,01 \dots 10 \text{ кГц}$.

Преимущество этого метода в простоте, однако недостаток заключается в низкой чувствительности на ранних стадиях аварии [5].

Для точной оценки состояния активных компонентов машины используются различные процедуры технической диагностики. Таким образом, система изоляции обмотки статора является критическим компонентом генератора, как показали международные опросы и статистика аварий.

Классическими методами для оценки состояния системы изоляции являются измерения показателя рассеивания и/или мощности и анализ тока поляризации/деполяризации.

Частичные разряды оказывают влияние на степень устойчивости и время жизни изоляции:

$$L = cE^{-n},$$

где n – константа степенного закона; c – константа; E – устойчивость изоляции (в кВ/мм); L – время жизни изоляции (в часах).

Частичные разряды – это маленькие электрические искры, которые возникают в воздушных карманах в изоляции или на поверхности изоляции катушки. Эти искры содержат электроны и ионы, которые бомбардируют целостную изоляцию. Органические материалы, такие как пленка, полиэстер, эпоксид, разрушаются под действием бомбардировок вследствие разрушения (разделения) определенных химических связей, таких как углеводородная связь [4]. Мониторинг активности частичных разрядов можно реализовать на основе данных о выделенном озоне.

Озон возникает, когда частичные разряды появляются на поверхности обмотки статора. Мониторинг озона в этом смысле означает выявление частичных разрядов на поверхности. Электрические сенсоры озона, использующие полевые металл–оксид–полупроводниковые транзисторы (МОП), сегодня широко доступны благодаря их низкой цене, так как они разрабатывались изначально для мониторинга загрязнения. Сенсоры озона располагаются внутри корпуса машины, в то время как измерительные инструменты могут располагаться снаружи [5].

Помимо диагностических измерений, технические характеристики (например, год создания, система изоляции, техника пайки) и постоянно заносимые в журнал данные (например, количество стартов, часы работы) снабжают ценной информацией для оценки состояния и рисков использования машин. Например, они дают информацию о нагрузке обмотки статора. Нагрузка обмотки статора зависит от режима работы машин (непрерывный или прерывистый), который имеет критическое влияние на изнашивание изоляции. С помощью сравнения часов работы и количества включений статора машины могут быть разделены на диапазоны различной нагрузки. Другая возможность сравнения машин с разными часами работы и количеством включений – вычислить "эквивалент часов работы":

$$T_E = T_o + n_s T_s ,$$

где T_E - эквивалент часов работы; T_o - период работы, часы работы; n_s – количество стартов; T_s - период работы под особой нагрузкой во время включения машин.

В мире с сопоставимыми расходами такие системы внедряются как в новых ГЭС, так и в старых, в рамках модернизации. Из таких систем самая известная – технология вибрационного управления, созданная компанией "National instruments", которая внедрена в ряде стран, в частности, в Словении, Австралии, Хорватии, где проблемы безопасности и оценки состояния решены с помощью мониторинга относительной вибрации вала, вибрации статора, обмотки статора, подшипников, отклонений подшипников, магнитного поля, активной и реактивной мощностей частичных разрядов, давления, уровня жидкости. Технологии "National instruments" предназначены для обеспечения надежной эксплуатации генераторов в электростанциях до 500 МВт. Вышеописанная технология определяется количеством вибраций. Эта технология включает в себя программируемые модульные платформы производственного назначения (CompactRio), а также специальные программные пакеты для интегрирования с системой SCADA и удобства в настройке [6].

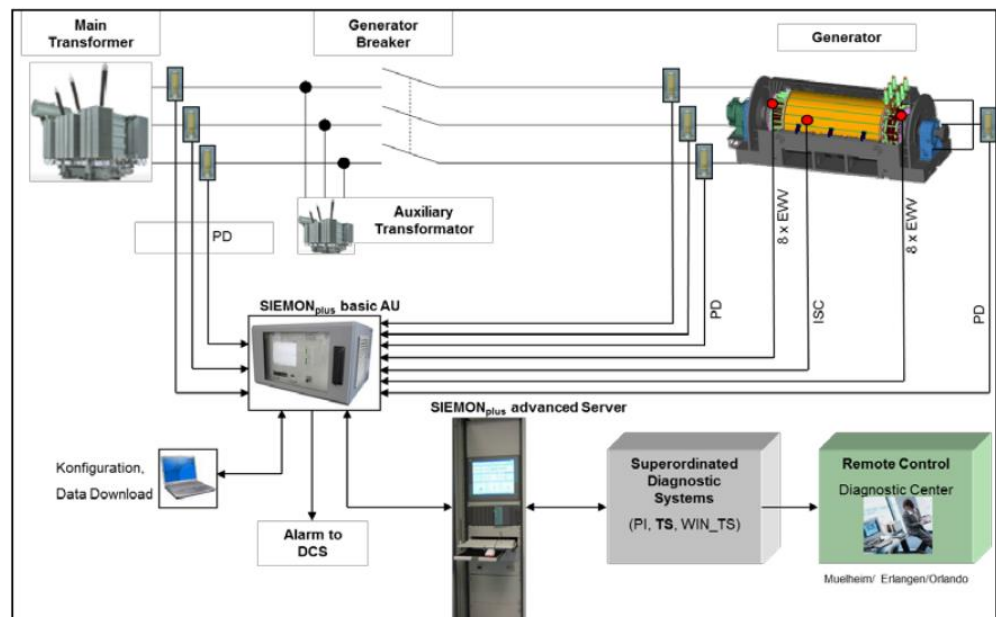


Рис. 4. Схема разработанной системы Siemens

Разработанные Siemens системы оценки и онлайн мониторинга состояния электрических машин также дают информацию в процессе эксплуатации (рис. 4).

Последняя направлена на решение задач обслуживания, которые обусловлены состоянием машины, в частности:

- онлайн мониторинг частичных разрядов, который дает возможность получить информацию о ненормальном состоянии системы изоляции мониторинга;
- система онлайн мониторинга передней части обмотки статора, дающая информацию о настоящих вибрациях в процессе работы, в зависимости от степени нагрузки;
- онлайн мониторинг магнитных потоков в воздушных зазорах, с помощью которого можно выявить короткие замыкания в витках обмотки ротора.

Несмотря на разнообразие существующих устройств и методов, мониторинг работы генераторов МГЭС и динамическое управление износом агрегатов продолжают оставаться актуальной проблемой. Существующие коммерческие системы невыгодны, многие из них дороги, по этой причине они не получили широкого применения при обслуживании электрических машин малой мощности [3]. С этой точки зрения, недорогие системы, основанные на подходящих алгоритмах и группировке правильно подобранных датчиков и устройств, со временем становятся необходимостью.

Система мониторинга и автоматизации работы генераторов МГЭС, основанная на управлении параметрами, которые характеризуют состояние гидрогенератора, дает возможность собирать необходимые данные в реальном времени, обрабатывать их и проводить соответствующий анализ, сообщать информацию о потенциальных авариях и необходимости ремонта генераторов.

Разработка эффективного метода оценки состояния и мониторинга гидрогенератора в целом подразумевает следующие шаги:

- выбор характеризующих факторов;
- разработка моделей деградации;
- формирование группы простых и дешевых устройств для измерения, сбора данных, обработки и регистрации выбранных факторов оценки состояния.

Система мониторинга и автоматизированного управления работой генераторов МГЭС должна обладать следующими свойствами:

- состоять из данных обоснованного количества датчиков, которые всесторонне характеризуют состояние гидрогенератора. Большое количество данных может привести к неоправданным затратам на отображение и обработку данных;
- быть простой, надежной, дешевой и с минимальным вмешательством человека;
- данные должны собираться в реальном времени;
- иметь возможность за короткое время выявить и изучить продолжительные неисправности;

- иметь стратегию принятия решений при необходимости выяснения потребности гидрогенератора в обслуживании, включая также возможности автоматического запуска, безопасной эксплуатации, функции защиты и остановки работы в экстремальной ситуации в условиях отсутствия обслуживающего персонала;

- иметь базу данных, которая позволяет совершать постоянный анализ параметров.

Заключение. Представлены преимущества и недостатки методов измерения наиболее важных параметров, характеризующих состояние генераторов, а также предложены системы мониторинга состояния генераторов, разработанные известными компаниями. В результате исследования разработаны этапы новой методологии оценки состояния генераторов МГЭС и определены требования к системе мониторинга и автоматического управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.** Electrical Insulation for rotating machines – Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair. 1st edition.- Wiley Interscience, Canada, 2004.- 371p.
2. **Հայաստանի Հանրապետության Հանրային ծառայությունները կարգավորող հանձնաժողով:** Էլեկտրական էներգիա արտադրող փոքր հիդրոէլեկտրակայանների հիմնական ցուցանիշները 2014 թվականի հոկտեմբերի 1-ի դրությամբ՝ ըստ շահագործող ընկերությունների, <http://www.psrc.am/>
3. **Акармазян А.С.** Выбор основных параметров, определяющих состояние и изношенность генераторов малых гидроэлектростанций // Вестник Инженерной академии Армении.- 2014.- Т.11, №2.- С. 262-266.
4. **Warwel M., Wittler G., Hirsch M., Reuss H.C.** Real-time coolant temperature monitoring in power electronics using linear parameter-varying models for variable coolant flow situations//Thermal Investigations os Ics and Systems (THERMINIC): 20th International Workshop.- 2014.- P. 1 – 4.
5. Insulation Failure Mechanisms of Power Generators / **R. Brutsch, M. Tari, K. Frohlich et al** // Electrical Insulation Magazine, IEEE.- 2008.- V.24, I.4.- P. 17 - 25.
6. <http://siemens.com/energy> Early detection and diagnostics of initiating damage in turbogenerators, 2014.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 15.02.2015.

Ա.Ս. ԱԿԱՐՄԱԶՅԱՆ

ՓԶԷԿ-Ի ԳԵՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ՄՈՆԻԹՈՐԻՆԳԻ ՄԵԹՈԴԱԲԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ: ՎԻՃԱԿԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ ԵՎ ԱՌԱՋԱՐԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Հիդրոէլեկտրակայանի սարքավորումների բարձր մաշվածության աստիճանը կարող է հանգեցնել վթարների հաճախության աճի, տեխնածին աղետների ռիսկի և էներգաապահովման մի շարք լուրջ խափանումների: Շահագործման ընթացքում խափանումներից խուսափելու համար կարևոր է կատարել տեխսպասարակում՝ հիմնված մեքենայի տեխնիկական վիճակի տվյալների վրա, ինչպես նաև անցկացնել մեքենայի վիճակը բնութագրող կարևորագույն պարամետրերի մոնիթորինգ: Գոյություն ունեցող կոմերցիոն մոնիթորինգի համակարգերը շահավետ չեն, դրանցից շատերը թանկարժեք են, որի պատճառով լայնորեն չեն կիրառվում փոքր հզորությամբ էլեկտրական մեքենաների դեպքում: Այս տեսանկյունից նոր, քիչ ծախսատար համակարգերը՝ հիմնված ինտելեկտուալ ալգորիթմների, ճիշտ ընտրված տվիչների և սարքավորումների համախմբի վրա, գնալով անհրաժեշտություն են դառնում: Հոդվածում ներկայացված են արդեն գոյություն ունեցող մոնիտորինգի մեթոդները, ինչպես նաև մշակվել են ՓԶԷԿ-ի գեներատորների վիճակի գնահատման նոր մեթոդաբանության փուլերը, և սահմանվել են մոնիթորինգի ու ավտոմատ կառավարման համակարգի առջև դրված պահանջները:

Առանցքային բառեր. մոնիթորինգ, հիդրոգեներատոր, ավտոմատացման համակարգեր, վերականգնվող էներգիա:

A.S. AKARMAZYAN

A METHODOLOGY FOR MONITORING THE SHPP GENERATORS: ANALYSIS OF THE STATE AND RECOMMENDATIONS

The high degree of deterioration of HPP equipment may lead to the increase of accidents, the risk of technological disasters and other serious disruptions in energy supply. In order to avoid any in-service failure, it is necessary to maintain and monitor the vital parameters which characterize the condition of the machine. The existing commercial systems are not profitable, most of them are expensive therefore are not widely used in low power electrical machines. From this viewpoint, cheap systems based on convenient algorithms and correctly selected sensors and equipment become necessary with the lapse of time. The existing methods for monitoring systems are presented, stages of a new methodology for condition evaluation of SHP' generators have been developed and requirements for the monitoring and automatic control system have been defined.

Keywords: monitoring, hydrogenerator, automation systems, renewable energy.

М.Э. АЙКАЗЯН

**ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ
ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ
АКУСТООПТИКИ**

Рассматриваются вопросы создания методики исследования акустооптических спектров при помощи вейвлет-преобразования для анализа данных, статистической обработки сигналов, предварительной цифровой обработки, а также создания фильтрованных сигналов и вейвлет-домен. Проведен регрессионный анализ данных от воздействия факторов. В вейвлет-домены включены эталонные сигналы, полученные из теоретически обоснованных функций соответствующего процесса.

Ключевые слова: акустооптика, цифровая обработка данных, статистическое исследование параметров сигнала, вейвлет-анализ.

Введение. В настоящее время в технике эксперимента востребованы простые и надежные методы обработки цифровых данных, основанные на математическом аппарате вейвлет-анализа, обладающего преимуществами по сравнению с большинством традиционных схем обработки экспериментальных сигналов. К разделам науки, где успешно применяются методы, основанные на вейвлет-преобразовании, относятся как чисто прикладные задачи (фильтрация сигналов, сжатие информации, распознавание речи, численное решение уравнений в частных производных, анализ сигналов и изображений в медицине, астрономии, сейсмологии, метеорологии, акустике и др.), так и задачи теоретической физики и математики (конформная теория поля, нелинейная динамика хаоса, функциональный анализ). Столь большой спектр приложений математического аппарата вейвлет-анализа объясняется, с одной стороны, его возможностями, с другой - легкостью практического применения [1].

Характерными чертами для современного состояния и развития научных направлений являются углубление и узкая специализация научной методологии и знаний в данной области, в результате чего происходит некоторое обособление и появляется дефицит обмена полезной информацией между этими направлениями. Это в некоторой степени сдерживает и замедляет внедрение новых эффективных методов решения, уже достигнутых в одном из направлений. Но это легко преодолимо, т.к. исследуемые процессы, явления и объекты, в основном, отличаются друг от друга градиентом и видом функциональных связей, которые можно решить применением определенного типа математического моделирования, а в нашем случае – вейвлет-преобразования.

Математический аппарат. С помощью предлагаемого метода во время исследований удалось существенно улучшить качество полученных результатов, применяя лишь программные методы обработки экспериментальных данных. Таким образом, открывается возможность значительного повышения точности измерений на действующих экспериментальных установках без модернизации аппаратной части путем лишь программной обработки получаемых данных с помощью вейвлет-анализа. В то же время предлагаемый алгоритм довольно прост в использовании и имеет наглядную интерпретацию, позволяющую избежать трудностей математического и практического характера для его применения в экспериментальной практике различных направлений.

Наиболее востребованы следующие вейвлет-преобразования: Хаара, Добеши, Гаусса, Мейера, Морле, Пауля, MНat (“мексиканская шляпа”), Р. Койфмана — койфлеты, Шеннона [2].

Достоинства вейвлет-преобразований:

- они обладают всеми достоинствами преобразований Фурье;
- вейвлетные базисы могут быть хорошо локализованными как по частоте, так и по времени. При выделении в сигналах хорошо локализованных разно-масштабных процессов можно рассматривать только те масштабные уровни разложения, которые представляют интерес;
- вейвлетные базисы, в отличие от преобразования Фурье, имеют много разнообразных базовых функций, свойства которых ориентированы на решение различных задач. Они могут реализоваться функциями различной гладкости.

Недостатком вейвлетных преобразований является их относительная сложность.

Сделан шаг к созданию общедоступных алгоритмов математической обработки больших массивов данных, цифровых кривых и изображений, пригодных для их массового применения в естественно-научных и технических приложениях. Стремительное развитие фундаментальных исследований, включающих в себя технику вейвлет-преобразования, показывает перспективность этого направления.

Существуют разные подходы использования анализа к оптическим сигналам. Оптический сигнал является регулярным сигналом, в котором однозначно определяются параметры зубцов сигнала. В [3] представляется алгоритм определения комплексов сигнала и параметров соответствующих зубцов. Быстро распространяемые сигналы “утоплены”, и с помощью вейвлет-преобразований можно определить, существует ли быстрый сигнал и имеется ли возможность локализовать эту информацию для дальнейшей обработки. В распоряжении исследователей имеется значительный арсенал математических методов, с помощью которых сигнал расчлениют на составляющие синусоиды различных частот [4]. Анализ Фурье, как математический метод для преобразований сигнала, основан на времени

и частоте, и каждый спектр Фурье получается из закодированных частей коэффициентов преобразования (небольшой волны). Нескольких из этих коэффициентов достаточно, чтобы закодировать необходимые особенности спектра. Классификация по частотам выполняется на закодированных векторах [5]. Обозначим векторы по n элементов выборки измеряемого сигнала как

$$\bar{f} = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}, \quad \bar{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}.$$

Если сигналы выразить через векторы, то исследование отношений между ними можно представить как отношения между векторами. Пусть $d(\bar{f}, \bar{x})$ - расстояние между векторами $\bar{f}$ и $\bar{x}$, от которого зависит степень их связи. Величину вектора $\bar{f}$ обозначим как $\|\bar{f}\|$ и назовем нормой вектора $\bar{f}$, а расстояние между векторами $\bar{f}$ и $\bar{x}$ - нормой $\|\bar{f} - \bar{x}\|$. Используя компоненты векторов, расстояние между сигналами можно записать в виде

$$d(\bar{f}, \bar{x}) = \|\bar{f} - \bar{x}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (t_i - x_i)^2}.$$

Для выражения связи между векторами используют скалярное произведение $\langle \bar{f}, \bar{x} \rangle$, которое определяется как $\langle \bar{f}, \bar{x} \rangle = \|\bar{f}\| \|\bar{x}\| \cos \theta$. Следовательно,

$$\cos \theta = \langle \bar{f}, \bar{x} \rangle / \|\bar{f}\| \|\bar{x}\| = r,$$

где θ – угол между векторами; r – коэффициент корреляции.

Скалярное произведение вектора $\bar{f}$ на самого себя равно

$$\langle \bar{f}, \bar{f} \rangle = \sum_{i=1}^n t_i^2 = \|\bar{f}\|^2.$$

Подставим полученные результаты в выражение коэффициента корреляции r следующим образом:

$$r = \sum_{i=1}^n x_i \cdot t_i / \left(\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2} \right).$$

Коэффициент корреляции r определяет связь расстояния между векторами и степень взаимоотношений сигналов.

Рассмотрим применение вейвлет-преобразований для расшифровки и оценки акустооптических сигналов. Частоты на плоскости спектра представляют последовательность коэффициентов Фурье небольшой волны и показывают точное местоположение неоднородности на изучаемом графике акустооптических сигналов. Главным преимуществом небольших волн является их способность представлять выявленные интервалы. Таким образом, они являются синусоидными сигналами с меньшей неоднородностью [3].

Отличительной особенностью алгоритма является использование вейвлет-преобразования исходного цифрового сигнала, позволяющего обходить сложности, связанные с необходимостью одновременного разрешения сигнала по частоте и времени. Адаптивные базисные функции вейвлет-преобразования, хорошо разрешающие по времени высокочастотные процессы, в то же время позволяют относительно точно работать с частотными характеристиками сигнала на больших временных интервалах. Это свойство метода оказывается весьма удобным во многих практических приложениях. Так, например, при удалении помех из цифровых сигналов оказывается возможным удалить помеху локально, не внося искажений в сигнал вне малой окрестности некоторой точки, вблизи которой убирается помеха. В быстрых преобразованиях Фурье такая возможность отсутствует.

В связи с отсутствием доступного специализированного программного обеспечения, пригодного для качественной автоматической обработки экспериментов по взаимодействию световых и акустических волн, основной целью работы являлось создание надежных и математически обоснованных методов решения задач обработки экспериментальных данных с последующей их программной реализацией. Приведены конкретные задачи, касающиеся разработки, тестирования и их внедрения в экспериментальную практику:

- алгоритмы автоматизированной обработки акустооптических сигналов;
- методы автоматического анализа сигналов со стоп-детектора для временной методики;
- методы автоматического поиска и параметризации источников гауссовой формы, необходимые для обработки акустооптических экспериментов.

Разработан и применен новый метод анализа токовых сигналов, позволяющий проводить надежную обработку зашумленных данных в автоматическом режиме. Предлагаемая методика состоит из двух этапов. На первом этапе исходный сигнал при помощи вейвлет-преобразований подвергается очистке от шумов. Для этого применяется специальный алгоритм разделения сигнала и шума с использованием дискретного вейвлет-преобразования, основанный на частотно-временном анализе сигнала.

Обоснован простой метод выделения полезного сигнала из набора данных на основании теоретически известного спектрального состава сигнала. Предложенная схема фильтрации и приведения к изолинии сигнала, в отличие от методов

Фурье-анализа, практически не искажает полезный сигнал, восстанавливая его с точностью до константы в заданном интервале времени. Для реализации второго этапа предложен алгоритм для автоматического выделения пиков полезного сигнала из зашумленных данных, основанный на применении дискретного вейвлет-преобразования с квадратичным сплайновым вейвлет-анализом в качестве базиса. На основе данного алгоритма создан пакет программ, позволяющий автоматизировать процесс анализа экспериментальных кривых для широкого круга исследований [6,7].

Обоснована методика обработки квазипериодических сигналов, основанная на применении непрерывного вейвлет-преобразования и псевдослейва Морле. В частности, методика расширена до применения к осциллирующим сигналам, основная частота которых является функцией времени, и выведены ограничения, в рамках которых схема обработки может успешно применяться. Разработан и применен новый метод обработки спектрометрических сигналов. Для сигналов, имеющих форму нормального распределения, предложена оригинальная методика разложения сигнала на гауссиану и шум, основанная на минимизации нормы разности анализируемой и тестовой функций в вейвлет-домен. Математически обоснована возможность восстановления функции с точностью порядка одного процента по ее вейвлет-преобразованию в узком диапазоне масштабов и параметров сдвига, что определяет практическую ценность данной методики. Схема была успешно применена к анализу спектров в экспериментах по радиационной безопасности.

Предложенные в настоящей работе методы анализа цифровых сигналов применяются в исследованиях по взаимодействию пучков света и звука в синтетических кристаллах. С помощью представленной методики проводилась тестовая обработка экспериментальных данных. Было установлено, что предлагаемые схемы решения задач обработки сигналов и изображений одинаково эффективно работают применительно к весьма широкому спектру прикладных задач. В результате выполненной работы можно сделать вывод о необходимости введения вейвлет-преобразования в повседневную практику физических измерений. Для эффективной обработки экспериментальных сигналов реализованы следующие пункты.

1. Развита методика фильтрации цифровых сигналов на основе дискретного вейвлет-преобразования. Указан выбор вейвлет-коэффициентов, значимых для восстановления сигнала с заданной точностью. Предложенные алгоритмы фильтрации применены для удаления помех. Методика обобщена на случай двумерных сигналов и использована для обработки спектров акустооптических изображений.

2. На основе дискретного вейвлет-преобразования построен алгоритм автоматического анализа цифровых сигналов. Метод позволяет определять характерные параметры цифровой кривой, такие как положение и амплитуды пиков

полезного сигнала, начало фронта нарастания и конец спада сигнала даже в случае присутствия сильных помех различного вида и артефактов [8].

3. Новый метод обработки сигналов со стоп-детектора, основанный на использовании непрерывного вейвлет-преобразования и вейвлета Морле, позволяет отследить изменение основной частоты сигнала в зависимости от времени и восстановить последовательность экстремумов затухающей структуры пучка даже в случае сильных шумов, сравнимых по мощности с полезным сигналом. Предлагаемый метод используется в настоящее время при обработке данных акустооптических процессов.

4. Разработана оригинальная методика обработки сигналов гауссовой формы на базе непрерывного вейвлет-преобразования с вейвлетом "мексиканская шляпа". Метод основан на минимизации нормы разности тестовой и анализируемой функций в вейвлет-домене. Построен новый алгоритм поиска гауссовых источников. Предложенная схема обработки сигналов применяется при автоматическом анализе спектрометрических данных в экспериментах по акустооптическим процессам в синтетических кристаллах.

По аналогии с интервальным преобразованием Фурье вводится непрерывное вейвлет-преобразование, поясняются принципиальные отличия этих двух подходов применительно к задачам частотно-временной локализации сигналов. Построение наиболее интересного с прикладной точки зрения дискретного вейвлет-преобразования существенно отличается от дискретизации преобразования Фурье, требуя введения некоторых дополнительных понятий, таких как фрейм, скейлинг-функция, кратномасштабный анализ. На примере вейвлета Хаара дано наглядное пояснение дискретного вейвлет-разложения. Рассмотрены приложения вейвлет-преобразования для сжатия информации, приведены алгоритмы быстрого вейвлет-преобразования, а также одна из возможных схем для распространения вейвлет-разложения на случай функций двух переменных, необходимая для преобразования изображений.

У небольших волн есть две характеристики представления - масштаб и время. Под характеристикой масштаба подразумевается понятие местной регулярности. В дополнение к спектральному анализу сигнала появляются его новые формы, которые меньше регулярных сигналов, чем обычные. Под характеристикой времени подразумеваются понятия целостности разложения, удаления шумов и сжатия процессов. Эта характеристика дает возможность обнаружить края разрыва на полученных графиках акустооптического сигнала (рис. 2 и 3) и при активных переходных процессах исследовать явления сокращенного времени. Форма небольшой волны ограничена последовательностью, у которой есть среднее число с нулевым значением. По продолжительности эти синусоиды не ограничены, они являются гладкими и предсказуемыми, а небольшие волны имеют

тенденцию быть нерегулярными и асимметричными. При анализе волн необходимо наличие банка эталонных небольших волн.

Аналогичный подход в перемодифицированном варианте используется для обработки акустических сигналов, где выступают 5 убывающих по максимальному значению амплитуд сигнала. Разумеется, что в эталонах небольших волн должно быть 5 групп волн, которые соответствуют зубцам сигнала с определенным коэффициентом. Проводя детальный анализ на ветках сигнала, можно найти амплитудное отклонение наличия небольших волн. Предлагаемый алгоритм учитывает особенности амплитудно-частотных характеристик акустооптических сигналов и состоит из двух этапов [3,8].

Выбор конкретного вида и типа вейвлетов во многом зависит от анализируемых сигналов и задач анализа, при этом немалую роль играют интуиция и опыт исследователя. Для получения оптимальных алгоритмов преобразования разработаны определенные критерии, но их еще нельзя считать окончательными, т.к. они являются внутренними по отношению к самим алгоритмам преобразования и, как правило, не учитывают внешних критериев, связанных с сигналами и целями их преобразований. Отсюда следует, что при практическом использовании вейвлет-преобразований необходимо уделять достаточное внимание проверке их работоспособности и эффективности для поставленных целей по сравнению с известными методами обработки и анализа.

Известно, что для обработки информации физических исследований необходимо с помощью автоматизированных аналитических программ получить промежуточный результат для обработки и получения информации, целью которой является оценка физического явления наблюдаемых акустооптических процессов. Это очень трудоемкий процесс, особенно в случаях, когда нет начальных данных для переноса и копирования в вычислительную среду. Разработанная методика позволяет с помощью математического анализа и статистических методов обработки получить соответствующую систему приема, фильтрации и преобразования данных.

Реализация методики. Существует множество методик обработки данных сигнала, но все они в целом не решают или решают частично эту задачу. Данная методика охватывает двенадцать шагов для распознавания и обработки сигнала.

Предварительным этапом обработки данных является наличие отсканированных фотографических рисунков (негативов) в черно-белом растровом изображении в формате jpg. При помощи программы Image Tools3.0 полученные данные записываем в отдельный txt файл. Из txt файла выбираем 1 и 3 колонки данных для последующего копирования в отдельный файл Microsoft Excel на отдельном листе.

В колонке *A* листа Excel-а помещаем относительные координаты x , а в колонке *B* - относительные координаты y . В колонках *C* и *D* следующие формулы « $=x^2$ » и « $=x*y$ » для составления линии тренда.

Используем метод наименьших квадратов, позволяющий получить регрессионные связи $y = f(x; a_0, a_1, \dots, a_n)$ с помощью нормальных уравнений [3] для прямолинейной связи $y_x = a_0 + a_1 x$:

$$\begin{cases} a_0 * n + a_1 * \sum x_i = \sum y_i, \\ a_0 * \sum x_i + a_1 * \sum x_i^2 = \sum y_i * x_i. \end{cases} \quad (1)$$

Отметим, что система получена из условия $dE/da_0 = 0$, $dE/da_1 = 0$, $dE/da_2 = 0$, $dE/da_3 = 0$, где E - сумма квадратов разностей $e_i = (y_{xi} - y_{xip})^2$ между экспериментальными и расчетными значениями y_{xi} и y_{xip} :

$$E = \sum_i^n e_i^2 = \sum_{j=1}^n (y_{xi} - y_{xip})^2 = \sum [y_{xi} - f(x; a_0, a_1, \dots, a_h)]^2 \Rightarrow \min. \quad (2)$$

Правильный выбор функции имеет важное значение для выполнения дальнейших расчетов и количественной оценки исследуемых акустооптических процессов. В задачах, где имеется априорная информация в виде взаимосвязи между параметрами процесса (например, связь между интенсивностью и координатной линией), применяются конкретные формы регрессионной связи.

В остальных случаях выбор уравнения регрессии выполняются графически, учитывая характер распределения экспериментальных данных в координатной системе (y, x).

В колонке *E* листа Excel-а записываем полученные значения $F(x) = A_0 + A_1 * x$, а в колонке *F* листа Excel-а - полученную изолинию, чтобы значения функции F_0 и F_n совпали со значениями в колонке *B*. Изолиния строится по следующей формуле: $I = Y_0 - A_0 * F_i$ ($i = 0, \dots, n$).

В колонке *F* листа Excel-а выбираем минимальное значение, в колонке *H* высчитываем базовую линию, соответствующую координатам абсцисс (БЛКА).

В колонке *I* листа Excel-а выбираем максимальное значение БЛКА.

В колонках *J*, *K* листа Excel-а формируем буфер 2^n точек для быстрого преобразования Фурье (БПФ).

В колонке *L* листа Excel-а задаем значения $1, \dots, n$ для проведения спектрального анализа (разложения в ряд Фурье).

В колонке *M* листа Excel-а производим вычисление прямого преобразования Фурье для определения амплитуд $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$, используя каталог анализа данных Microsoft Excel, где

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos(n\omega_1 t) dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin(n\omega_1 t) dt, \quad \varphi_n = \arctg\left(\frac{b_n}{a_n}\right). \quad (3)$$

В колонке N листа Excel-а записываем абсолютное значение комплексного числа определяемой функций МНИМ.АБС() из каталогов функций инженерных расчетов Microsoft Excel.

Из абсолютных значений выбираем последовательно максимумы наиболее встречающихся амплитуд, запоминая соответствующие индексы в колонках O, P, Q на листах Excel-а.

Ранжируя по убыванию, отмечаем только первые двенадцать коэффициентов. Обнуляем соответствующие коэффициенты номера индексов остальных амплитуд и запоминаем их.

В колонке R листа Excel-а записываем отфильтрованные значения первых двенадцати коэффициентов.

В колонке S листа Excel-а производим обратное преобразование Фурье значений из колонки R и экстраполируем значения 256 точек.

В колонке T листа Excel-а записываем реальные значения, полученные из колонки S . Полученный результат представляем в графическом виде, записывая в отдельной диаграмме Excel-а. В колонках W и X параллельно записываются коэффициенты вещественной и мнимой частей комплексного числа, что дает возможность представить функцию в аналитическом виде:

$$y = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} (a_i \cos i\omega_1 t + b_i \sin i\omega_1 t). \quad (4)$$

Результаты методики представлены на рис. 1 - 4.

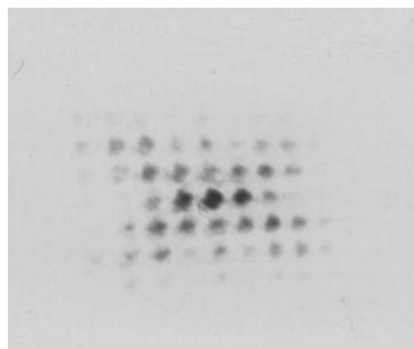


Рис. 1. Фотографическое изображение дифракционного процесса

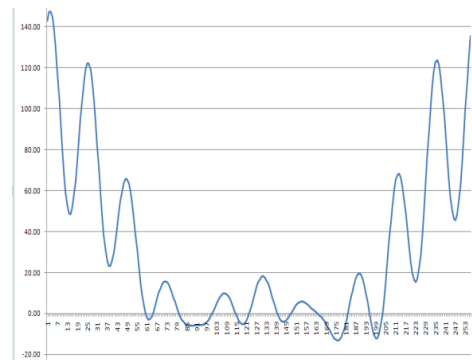


Рис.2. График отфильтрованного сигнала

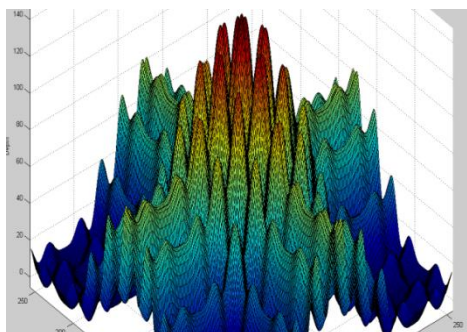


Рис.3. Пространственное представление отфильтрованного сигнала

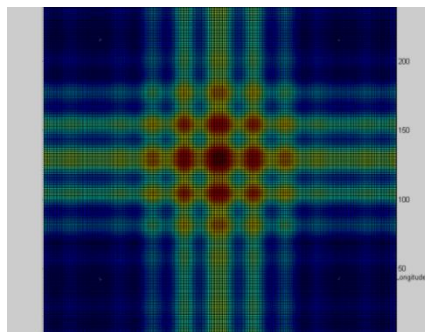


Рис. 4. Поверхностное представление отфильтрованного сигнала

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Балаттер К.** Вейвлет-анализ. Основы теории. – М.: Техносфера, 2004. – 280 с.
2. **Дьяконов В.П.** MATLAB 7/R2006/R2007. - М.: ДМК Пресс, 2010. – 768 с.
3. **Айказян М.Э.** Программное обеспечение результатов акустооптических процессов в кристалле SiO₂// Вестник ИАА. – 2013. – Т.10, № 4. – С. 755-759.
4. **Борисенко Н.А., Орехов С.Б.** Применение вейвлет-преобразования для анализа сигналов ЭКГ и РВГ // Инженерная физика. – 2002. – № 5. – С. 9-12.
5. **Стакян М.Г., Систани Ш.Дж., Айказян М.Э.** Программное обеспечение количественной оценки процесса упрочнения вала// Вестн. ГИУА (Политехник). – Серия “Механика, Машиноведение, Машиностроение”.-2013. - Т.15, №2. – С.49–57.
6. **Стакян М.Г., Систани Ш.Дж., Айказян М.Э.** Математическое моделирование процесса упрочнения рабочих поверхностей// Известия НАН РА и ГИУА. - 2013. - Т.66, №1. - С. 20–27.
7. **Стакян М.Г., Систани Ш.Дж., Айказян М.Э.** Моделирование физико-технического состояния поверхностных слоев деталей при применении упрочняющих технологий // Вестн. ГИУА(Политех). Серия “Механика, Машиноведение, Машиностроение”. 2013. – Т.15, №1. - С. 68–74.
8. **Анютин А.П., Кюркчан А.Г.** Решение задач теории дифракции и антенн с использованием метода продолженных граничных условий и техники вейвлета // Радио и Электроника. – 2004. - Т.49, № 1.– С. 15-23.

Лаборатория мессбауровской спектроскопии ИППФ НАН РА. Материал поступил в редакцию 28.10.2014.

Մ.Է. ՀԱՅԿԱԶՅԱՆ

**ՁԱՅՆԱՕՊՏԻԿԱՅԻ ԽՆԴԻՐՆԵՐՈՒՄ ՓՈՐՁՆԱԿԱՆ ՏՎՅԱԼՆԵՐԸ ՄՇԱԿԵԼԻՄ
ՎԵՑՎԼԵԹ-ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅԱՆ ՄԵԿ ԿԻՐԱՌՄԱՆ ՄԱՍԻՆ**

Քննարկվում են ձայնաօպտիկական գործընթացների հետազոտման մեթոդների ստեղծման վեյվլեթ ձևափոխություններով ազդանշանի վիճակագրական, նախնական թվային մշակման և ֆիլտրած ազդանշանի հետազոտման հարցերը: Կատարվել են գործոնների ազդեցության առկայությամբ տվյալների ռեգրեսիոն վերլուծությունը և վեյվլեթ դոմենների ձևավորումը: Նմուշային վեյվլեթ դոմենում ընդգրկված են տվյալ գործընթացներին համապատասխան տեսականորեն հիմնավորված ազդանշանների ֆունկցիաները:

Առանցքային բառեր. ձայնաօպտիկա, տվյալների թվային մշակում, ազդանշանի պարամետրերի վիճակագրական հետազոտում, վեյվլեթ – վերլուծություն:

M.E. HAYKAZYAN

**AN APPROACH TO THE USE OF THE WAVELET-ANALYSIS FOR
EXPERIMENTAL DATA PROCESSING IN PROBLEMS OF
ACOUSTOOPTICS**

The issues on creating a research technique of acoustooptical spectra using a wavelet transform for analyzing the data, statistical signal processing, preliminary digital processing, as well as for creating filtered signals and wavelet domains are considered. Regression analysis of the data at the impact of factors is carried out. In wavelet domains, reference signals derived from theoretically substantiated functions of the conformed process are included.

Keywords: acoustooptics, digital processing, statistical research of the signal parameters, wavelet analysis.

Р.М. МАРТИРОСЯН, А.Г. ГУЛЯН, Г.А. ПИРУМЯН, С.А. САРКИСЯН
Г.С. АВETИСЯН

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИОТЕЛЕСКОПА РТ-13 ИПА РАН

Приведены результаты фокусировки и измерения параметров радиотелескопа РТ-13 ИПА РАН в пункте назначения в диапазонах S, X, Ka по эталонному космическому радиоисточнику “Кассиопея-А”, согласно разработанной в ИРФЭ НАН РА программе/методике, для высокоточного и оперативного обеспечения Глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) данными о координатах полюса, Всемирном времени и для связи с международной сетью РСДБ (Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами) и другими международными службами.

Ключевые слова: радиотелескоп, юстировка, шумовая температура.

Введение. Глобальная навигационная спутниковая система разработана по заказу Министерства обороны СССР/РФ в рамках федеральной целевой программы “Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы” и является одной из двух функционирующих на сегодня систем глобальной спутниковой навигации. ГЛОНАСС предназначена для оперативного навигационно-временного обеспечения неограниченного числа пользователей наземного, морского, воздушного и космического базирования. Доступ к гражданским сигналам ГЛОНАСС в любой точке земного шара предоставляется российским и иностранным потребителям на безвозмездной основе и без ограничений.

Основой системы должны являться 24 спутника, движущихся над поверхностью Земли в трёх орбитальных плоскостях с наклоном орбитальных плоскостей $64,8^\circ$ и высотой 19100 км. Принцип измерения аналогичен американской системе навигации NAVSTAR GPS. Основное отличие от системы GPS в том, что спутники ГЛОНАСС в своём орбитальном движении не имеют резонанса (синхронности) с вращением Земли, что обеспечивает им большую стабильность. Таким образом, группировка КА ГЛОНАСС не требует дополнительных корректировок в течение всего срока активного существования.

Целью выполнения работы является разработка программы/методики для фокусировки и исследования характеристик радиотелескопа РТ-13 ИПА РАН (Институт прикладной астрономии Российской академии наук), а также проведение измерений на пунктах назначения.

Объектом исследования является построенный по двухзеркальной схеме с кольцевым первичным фокусом трехдиапазонный радиотелескоп РТ-13 ИПА РАН, на котором установлена радиоастрономическая приемная система (РПС) с криостатируемым трехдиапазонным облучателем и малошумящими усилителями

(МШУ). Рабочие диапазоны частот радиотелескопа: S – (2,2...2,6) ГГц, X – (7,0...9,5) ГГц и Ка – (28...34) ГГц.

1. Программа и методика определения оптимального положения контррефлектора (фокусировка). Оптимальное положение контррефлектора радиотелескопа (фокусировка) и величины смещения фазовых центров облучателя в S-, X- и Ка-диапазонах волн относительно оптимального положения контррефлектора ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$) определялись с помощью программы слежения космического радиоисточника путем выбора положения контррефлектора, обеспечивающего соответствие формы диаграммы направленности (ДН) расчетной (достижением максимального приращения выходного сигнала). Фокусировка проводилась при угле места 45° . Исследование характеристик радиотелескопа проводилось после его фокусировки. В табл.1 приведены поправки от отсчетного ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$) положения контррефлектора.

Таблица 1

№	Название характеристик Смещение от отсчетного ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$) положения контррефлектора	Ед. изм.	Величина
1		мм	
2	Δx_s	мм	3
3	Δy_s	мм	-2
4	Δz_s	мм	2
5	Δx_x	мм	-1
6	Δy_x	мм	3
7	Δz_x	мм	2
8	Δx_k	мм	0
9	Δy_k	мм	2
10	Δz_k	мм	1
11	Δx	мм	0,7
12	Δy	мм	1
13	Δz	мм	1,7

2. Программа исследования характеристик радиотелескопа РТ-13 ИПА РАН. Измерения проводились в обсерватории ИПА РАН “Бадары” при слабой облачности и средней температуре -20°C в период с 26.11.2014 по 06.12.2014 гг. по эталонному радиоисточнику “Кассиопея-А” со следующими характеристиками:

- прямое восхождение - $\alpha_{1950,0} = 23^h 21^m 10^s 2$;

- склонение - $\delta_{1950,0} = 58^\circ 32' 40'' 5$. (1)

Значения экваториальных координат для данной эпохи М вычисляются по формулам [1]

$$\begin{aligned} \alpha_{2014} &= \alpha_{1950,0} + (2014 - 1950) \times 2^s 70 ; \\ \delta_{2014} &= \delta_{1950,0} + (2014 - 1950) \times 19'' 761 ; \end{aligned} \quad (2)$$

а значения плотности потока для данной эпохи - по формулам [2]

$$\log F_{1980,0} = 5,745 - 0,770 \log f, \quad (3)$$

$$F_{2014} = F_{1980,0} [1 - (0,0097 - 0,0003 \log f)]^{2014-1980},$$

где f - частота в гигагерцах. В табл. 2 представлены значения плотностей потоков на рабочих частотных диапазонах.

Таблица 2

Диапазон	S	X ₁	X ₂	X ₃	Ka ₁	Ka ₂	Ka ₃
ГГц	2,4	7,0	8,25	9,5	28,0	31,0	34,0
$F_{2014} 10^{-26}, Bm/m^2$	950	430	380	340	150	141	128

3. Определение шумовой температуры антенны по всему угловому разрезу с шагом $\Delta h=10^\circ$.

- 3.1. Записываем выходной уровень при отключенном приемнике (РПС).
- 3.2. Включаем РПС и записываем выходной уровень $T_{ША}$.
- 3.3. Включаем внутренний генератор шума (ГШ) и записываем выходной уровень $T_{ША} + T_{ГШ}$.
- 3.4. По показаниям 3.1, 3.2 и 3.3 определяем $T_{ША}$.
- 3.5. Пункты 3.1-3.4 выполняем в S-, X-, Ka- диапазонах (табл. 3).

Таблица 3

Диапазон S								
H (град)	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
$T_{ША} (K)$	67	79	92	107	122	137	147	157
Диапазон X								
H (град)	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
$T_{ША} (K)$	63	78	98	123	143	163	173	183
Диапазон Ka								
H (град)	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
$T_{ША} (K)$	196	204	216	218	231	241	256	273

На рис. 1, 2 приведены угловые зависимости шумовой температуры антенны в диапазонах X и Ka.

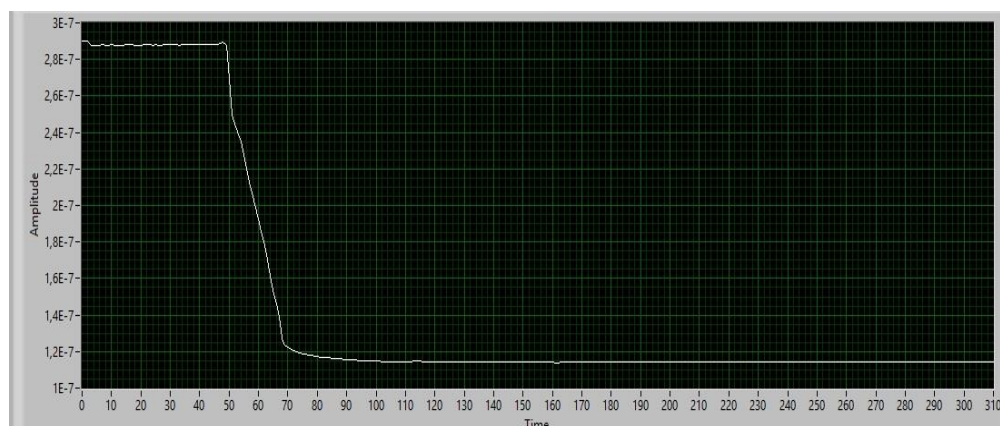


Рис. 1. Разрез атмосферы в диапазоне X

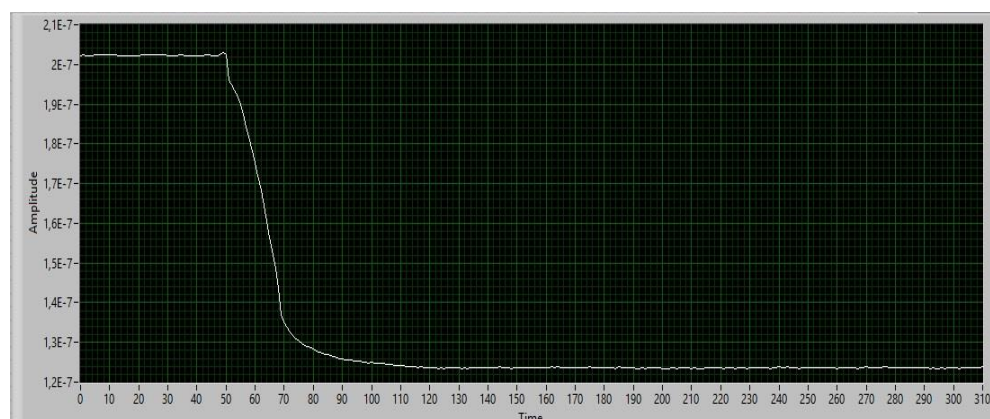


Рис. 2. Разрез атмосферы в диапазоне Ka

4. Измерение смещений электрической оси антенны от геометрической по всему угловому разрезу с шагом $\Delta h=10^\circ$.

4.1. Устанавливаем антенну на программу слежения источника “Кассиопея А” с нулевыми поправками по углу и азимуту.

4.2. Изменением программных величин азимута и угла места добиваемся максимального приращения выходного сигнала источника.

4.3. Пункты 4.1-4.2 выполняем в S-, X-, Ka - диапазонах (табл. 4).

Таблица 4

Диапазон S	Диапазон X	Диапазон Ka
$\Delta h_S = 30'$	$\Delta h_X = 26'$	$\Delta h_{Ka} = 20'$
$\Delta A_S = -14'$	$\Delta A_X = -10'$	$\Delta A_{Ka} = -15'$

5. Измерение ширины диаграмм направленности антенны, их зависимость от угла места ($\Delta h=10^\circ$) в S-, X-, Ka - диапазонах.

5.1. Радиотелескоп устанавливаем на программу слежения траектории источника “Кассиопея А” и с учетом поправок ΔA , Δh и рефракции достигаем максимального уровня выходного сигнала.

5.2. Останавливаем движение антенны по азимуту, определяем временной отрезок между значениями выходных сигналов $T_{\text{ист.макс}}$ и $0,5T_{\text{ист.макс}}$ в единицах времени ($\Delta t_{0,5}$) и находим половину ширины кривой прохождения по формуле

$$\varphi_{0,5 \text{ изм}} = 15 * \Delta t_{0,5} * \cos \delta_m.$$

Ширину ДН азимутальной плоскости вычисляем по формуле

$$\varphi_{0,5} = 2 \sqrt{\varphi_{0,5 \text{ изм}}^2 - 2(\ln 2)R^2},$$

где $\delta_m = \delta_{1950,0} + (M - 1950) \times 19'' 761 = 58^\circ 53' 40''$.

5.3. С учетом п.4.1 останавливаем движение антенны по угломестной координате, определяем временной отрезок между значениями выходных сигналов $T_{\text{ист.макс}}$ и $0,5T_{\text{ист.макс}}$ в единицах времени ($\Delta t_{0,5}$) и находим половину ширины кривой прохождения по формуле

$$\theta_{0,5 \text{ изм}} = \Delta t_{0,5} 15 \cos \delta_m.$$

Ширину ДН направленности в угломестной плоскости вычисляем по формуле

$$\theta_{0,5} = 2 \sqrt{\theta_{0,5 \text{ изм}}^2 - 2(\ln 2)R^2},$$

где $\delta_m = \delta_{1950,0} + (M - 1950) \times 19'' 761 = 58^\circ 53' 40''$; $R = 2' 15''$ - радиус диска радиисточника “Кассиопея - А”.

5.4. Пункты 5.1-5.3 выполняем в S-, X-, Ka- диапазонах (табл. 5).

Таблица 5

Диапазон S								
h	80°	70°	60 °	50 °	40 °	30 °	20 °	10 °
$\theta_{0,5}$	31' 50"	32' 00"	32' 05"	32' 15"	32' 20"	32' 25"	32' 25"	32' 30"
$\varphi_{0,5}$	31' 20"	31' 25"	31' 32"	31' 36"	31' 40"	31' 50"	31' 55"	32' 00"

Диапазон Ка								
h	80°	70°	60 °	50 °	40 °	30 °	20 °	10 °
$\theta_{0,5}$	2' 17"	2' 19"	2' 20"	2' 23"	2' 25"	2' 28"	2' 30"	2' 30"
	2' 03"	2' 05"	2' 08"	2' 11"	2' 14"	2' 17"	2' 03"	2' 20"
	1' 52"	1' 53"	1' 55"	1' 58"	2' 00"	2' 03"	2' 05"	2' 08"
$\varphi_{0,5}$	2' 16"	2' 18"	2' 19"	2' 22"	2' 24"	2' 25"	2' 27"	2' 28"
	2' 03"	2' 05"	2' 08"	2' 11"	2' 14"	2' 16"	2' 17"	2' 18"
	1' 45"	1' 46"	1' 47"	1' 50"	1' 52"	1' 54"	1' 56"	1' 58"

Диапазон X								
h	80°	70°	60 °	50 °	40 °	30 °	20 °	10 °
$\theta_{0,5}$	9'04"	9'08"	9'10"	9'12"	9'15"	9'25"	9'26"	9'28"
	7'42"	7'44"	7'50"	7'54"	7'58"	8'00"	8'04"	8'10"
	6'41"	6'47"	6'52"	6'55"	7'00"	7'05"	7'10"	7'15"
$\varphi_{0,5}$	9'03"	9'08"	9'12"	9'15"	9'20"	9'24"	9'28"	9'30"
	7'35"	7'39"	7'43"	7'48"	7'51"	7'55"	7'58"	8'00"
	6'37"	6'40"	6'43"	6'47"	6'50"	6'55"	6'58"	7'00"

6. Измерение эффективной площади антенны.

6.1. Включаем РПС, выбираем требуемый частотный диапазон и направляем на “холодное” небо близ возможно высокой угломестной координаты траектории радиоисточника.

6.2. Включаем ГШК и измеряем величину выходного сигнала АС ($T_{\text{гшк}}$).

6.3. Выходим на программу радиоисточника с учетом поправок контррефлектора, ΔA , Δh и измеряем величину выходного сигнала АС ($T_{\text{ист}}$).

6.5. Эффективную площадь вводим по следующей формуле [3]:

$$A_{\text{эфф}} = g \frac{2KT_{\text{ист}}}{F},$$

где $A_{\text{эфф}}$ - эффективная площадь антенны; $K=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град}$ – постоянная Больцмана; F - спектральная плотность потока излучения радиоисточника ($\text{Вт/м}^2 \text{ Гц}$); g - безразмерная величина, которая учитывает соизмеримость угловых размеров источника и ширины антенны и вычисляется из выражения

$$g = \left\{ \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{R}{0,6\theta_{0,5}} \right)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{R}{0,6\theta_{0,5}} \right)^4 \right] \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{R}{0,6\varphi_{0,5}} \right)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{R}{0,6\varphi_{0,5}} \right)^4 \right] \right\}^{\frac{1}{2}},$$

R – угловой размер радиоисточника.

6.6. Выполняем пункты 6.1 - 6.5 для убывающей угломестной координаты с шагом $\Delta h = 10^\circ$.

6.7. Производим операции по пп. 5.1-5.6 в диапазонах “X” и ”Ka”.

По результатам измерений параметров, указанных в пп. 5.1-5.7, по формулам

$$\text{КИП} = A_{\text{эфф}} / A_{\text{геом}}, \quad \text{ЭПППС} = 2KT_{\text{сист}} / A_{\text{эфф}}$$

определяем зависимость коэффициента использования поверхности (КИП) и эквивалентной плотности потока приемной системы (ЭПППС) от угла места (табл. 6).

Таблица 6

Диапазон S								
h	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
A _{эфф.}	90	89	87	87	86	85	84	84
КИП	0,68	0,67	0,65	0,65	0,65	0,64	0,63	0,63
SEFD	1983	2371	2844	3305	3767	4294	4680	4998
Диапазон X								
h	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
A _{эфф.}	86	85	85	84	83	82	81	80
КИП	0,70	0,69	0,69	0,67	0,67	0,66	0,66	0,65
SEFD	1940	2262	2842	3673	4270	4941	5244	5632
Диапазон Ka								
h	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
A _{эфф.}	68	67	66	66	65	63	61	60
КИП	0,51	0,5	0,5	0,5	0,49	0,47	0,46	0,45
SEFD	7686	8160	8640	8720	9429	10255	11130	12044

7. Измерения уровней ближних боковых лепестков

7.1. Радиотелескоп с учетом всех поправок устанавливаем на программу слежения траектории радиоисточника с временным опережением не менее шестикратной ширины главного лепестка, обеспечивающую прохождение источника через главный и ближайшие боковые лепестки ДН.

7.2. Останавливаем антенную систему (АС) по обеим координатам и измеряем величину выходного сигнала АС ($T_{\text{ш.сист.}}$).

7.3. Для калибровки АС включаем ГШК и измеряем величину выходного сигнала АС ($T_{\text{ГШК}}$).

7.4. При прохождении радиоисточника через боковые лепестки ДН, при необходимости, с учетом динамического диапазона АС выбираем необходимое усиление и измеряем величины выходных сигналов АС ($T_{\text{бок. макс.л}}$, $T_{\text{бок. макс.п}}$).

7.5. По выходным значениям $T_{\text{бок. макс.л}}$, $T_{\text{бок. макс.п}}$ и $T_{\text{ист. макс}}$ (рис. 3) определяем уровни боковых лепестков.

7.6. Производим операции по пп. 7.1- 7.6 для частотных диапазонов “Х” и “Ка” (табл. 7).

Таблица 7

Диапазон S								
h	80°	70°	60 °	50 °	40 °	30 °	20 °	10 °
Бок.л.	25	24	23,5	23	22,5	22	22	21
Бок.п.	19	18,8	18,5	18	17,4	17	16,5	16
Диапазон X								
h	80°	70°	60 °	50 °	40 °	30 °	20 °	10 °
Бок.л.	24	23	22,5	22	21,5	21	20	19
Бок.п.	17,5	17,3	17	16,5	16,1	15,7	15,2	15
Диапазон Ka								
h	80°	70°	60 °	50 °	40 °	30 °	20 °	10 °
Бок.л.	21	20,5	20	20	19	18,5	18	17
Бок.п.	16	16,7	16,2	16	15,5	15	14,5	14

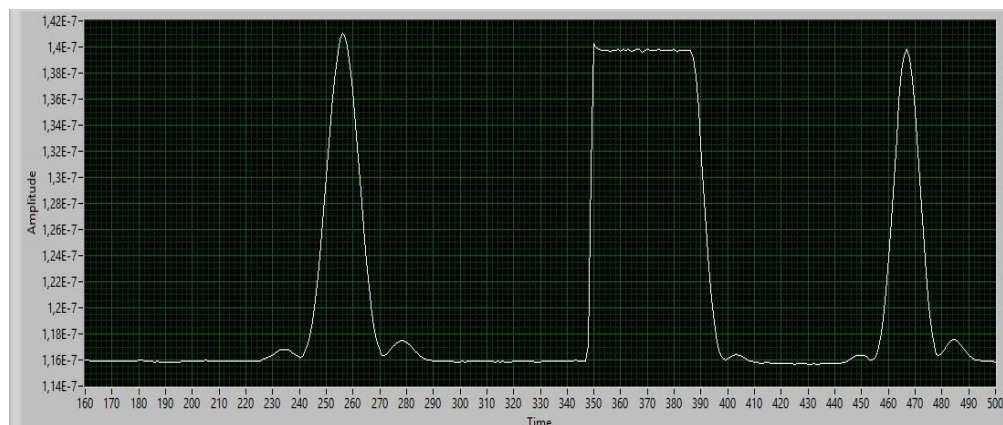


Рис. 3. Сканирование источника “Кассиопея-А”

Выводы

1. Значения измеренных характеристик РТ-13 в основном соответствуют ожидаемым.

2. Параметры РТ-13 измерялись в дневное время суток и при температурах окружающей среды -20°C и ниже. С целью уменьшения воздействия солнечного излучения следует измерения повторить при умеренных температурах и в ночное время суток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астрономический ежегодник (постоянная часть).
2. Baars J. W., Genzel R., Payting-Toth I. I. K., Witzel // Astrophys J. - 1977. - V.61. - P. 99.
3. Цейтлин Х.М. Антенная техника в радиоастрономии.-М.: Сов. радио, 1976.

Институт Радиофизики и электроники НАН РА. Материал поступил в редакцию 12.03.2015.

Ռ.Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Ա.Գ. ԴՈՒԼՅԱՆ, Հ.Ա. ՓԻՐՈՒՄՅԱՆ, Ս.Ա. ՍԱՐԳՍՅԱՆ,
Գ.Ս. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ

РТ-13 ИПА РАН НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ РАДИОТЕЛЕСКОП

Ներկայացված են բևեռի կոորդինատների և Համաշխարհային ժամանակի ճշգրիտ տվյալներով ԳԼՈՆԱՍՍ համակարգի ապահովմանը, ինչպես նաև միջազգային համանման ցանցերին միանալու հնարավորությունը միտված, ՀՀ ԳԱԱ ՌՖԷԻ-ում մշակված ծրագիր/մեթոդի հիման վրա «Կասիոպեա-Ա» կոսմիկական էտալոնային ռադիոաղբյուրի միջոցով հաճախային S, X, և Ka տիրույթներում իրականացված ՌՄ-13 ԿԱԻ ՌԳԱ ռադիոդիտակի ճշտադրման և բնութագրերի չափման արդյունքները:

Առանցքային բառեր. ռադիոդիտակ, ճշտադրում, ադմկային ջերմաստիճան:

R.M. MARTIROSYAN, A.G. GULYAN, H.A. PIRUMYAN, S.A.SARGSYAN,
G.S. AVETISYAN

MEASURING THE RADIOTELESCOPE PARAMETERS

The results of focusing and measurements of the parameters of IAA RAS (Institute of Applied Astronomy of Russian Academy of Sciences) radio telescope RT-13 in the ranges of S, X, Ka based on the space radiation source of "Kassiopeya-A" which is a program/technique developed in IRPhE NAS RA (Institute of Radiophysics and Electronics National Academy of Sciences of Republic of Armenia), as well as the results of high-precision data of pole coordinates and World time for providing GLONASS and making connections with the international VLBI (Very Long Baseline Interferometry) -network and other international services are introduced.

Keywords: radio telescope, adjustment, noise temperature.

Կ.Գ. ԱՅՎԱԶՅԱՆ, Ս.Խ. ԽՈՒԴԱՎԵՐԴՅԱՆ

ՄԱՍՆԱԿԻՈՐԵՆ ՍՏՎԵՐՎԱԾ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹՈՎ ԱՐԵՎԱՅԻՆ ՄՈԴՈՒԼԻ
ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ ԵՎ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Փորձնականորեն հետազոտվել և Bishop-ի մոդելի հիման վրա մոդելավորվել են մասնակիորեն ստվերված արևային մոդուլների վոլտամպերային և հզորության բնութագրերը: Ցույց է տրվել, որ այդպիսի մոդուլների հզորության կորուստները համարժեք չեն ստվերված տիրույթի ընդհանուր մակերեսին:

Առանցքային բառեր. արևային մոդուլ, բնութագիր, ստվերված մակերեսային, հզորության կորուստ:

Արևային էներգիայի անմիջական փոխարկումը էլեկտրականի կատարվում է կիսահաղորդչային արևային էլեմենտների (ԱԷ) միջոցով: Վերջիններս հաջորդաբար և զուգահեռ համապատասխան միացումներով հավաքվում են մեկ արևային մոդուլի մեջ՝ ապահովելով լարման և հոսանքի պահանջվող արժեքները [1]:

Շահագործման ռեժիմում արևային մոդուլների արդյունավետության վրա բացասաբար ազդող գործոններից է ԱԷ-երի մասնակիորեն ստվերումն արտաքին արգելքներով, ամպերով կամ հարևան արևային մոդուլներով: Ստվերի ազդեցությունը հանգեցնում է մոդուլների ելքային բնութագրերի վատացմանը և հզորության կորուստների:

Գրականության մեջ ստվերման ազդեցությունը մոդելավորելու համար հիմնականում կիրառվում է ԱԷ-ի մեկ դիոդային մոդելի հիման վրա ստացված ԱԷ-ի վոլտամպերային բնութագրի (ՎԱԲ) հետևյալ արտահայտությունը [2-5].

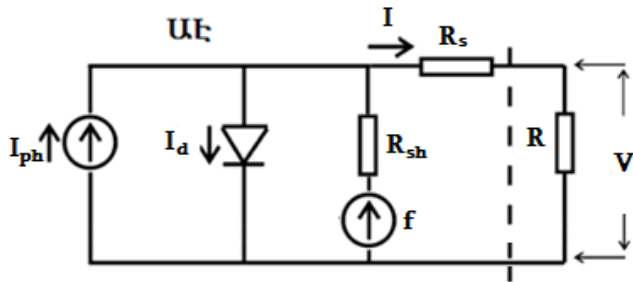
$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{d k T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}}, \quad (1)$$

որտեղ I_{ph} -ն ֆոտոհոսանքն է, I_0 -ն՝ հազեցման հոսանքը, q/kT -ն՝ ջերմային պոտենցիալը, k -ն՝ Բոլցմանի հաստատունը, T -ն՝ բացարձակ ջերմաստիճանը, q -ն՝ էլեկտրոնի լիցքը, d -ն՝ իդեալականացնող (դիոդային) գործակիցը, V -ն՝ կիրառված լարումը, R_s -ն և R_{sh} -ն՝ համապատասխանաբար պարազիտային հաջորդական և զուգահեռ դիմադրությունները:

Նշված արտահայտությունը նկարագրում է ԱԷ-ի ՎԱԲ-ը լարման դրական (լուսային) տիրույթում: Մյուս կողմից, երբ արևային մոդուլի ԱԷ-երից մեկը կամ մի քանիսը ստվերված են, ապա դրանք որոշակի պայմաններում սկսում են գործել

հակառակ ուղղությամբ՝ բացասական լարման (մթնային) տիրություն: Այս դեպքում մեկ դիոդային մոդելի կիրառումը կարող է հանգեցնել մեծ սխալների: Մասնավորապես, ենթադրվում է, որ ստվերման հետևանքով հզորության կորուստներն ուղիղ համեմատականորեն կախված են ստվերված մակերևույթի մակերեսից և այդ տիրություն լույսի ինտենսիվության նվազման աստիճանից [4-7]:

Աշխատանքում մասնակիորեն ստվերված մակերևույթով արևային մոդուլի մոդելավորման համար կիրառվել է, այսպես կոչված, “Bishop-ի մոդելը”, որը նկարագրում է ԱԷ-ի վարքը լարման դրական (լուսային) և բացասական (մթնային) տիրություններում [6]: Հստ այդ մոդելի՝ ԱԷ-ի համարժեք սկզբունքային էլեկտրական սխեման ունի նկ. 1-ում պատկերված տեսքը և մեկ դիոդային մոդելի սկզբունքային էլեկտրական սխեմայից տարբերվում է հակադարձ շեղված f հոսանքի գեներատորի առկայությամբ:



Նկ. 1. ԱԷ-ի համարժեք սկզբունքային էլեկտրական սխեման՝ ըստ Bishop-ի մոդելի

Bishop-ի մոդելի հիման վրա ԱԷ-ի ՎԱԲ-ը նկարագրվում է հետևյալ արտահայտությամբ [8].

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{akT} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} - a \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \left(1 - \frac{V + R_s I}{V_{br}} \right)^{-m}, \quad (2)$$

որտեղ V_{br} -ն թունելային ծակման լարումն է, a -ն և m -ն հաստատուն մեծություններ են:

Քանի որ արևային մոդուլները գործնականում գերազանցապես հավաքվում են հաջորդաբար միացված ԱԷ-երով, ուստի դիտարկենք այդպիսի մոդուլ՝ բաղկացած k հատ ոչ ստվերված (նորմալ) և n հատ մասնակիորեն ստվերված ԱԷ-ներից: Մոդուլի ընդհանուր էլքային հոսանքը, լարումը և հզորությունը որոշվում են հետևյալ արտահայտություններով.

$$I_M = I_1 = I_2, V_M = V_1 + V_2, P_M = V_M I_M, \quad (3)$$

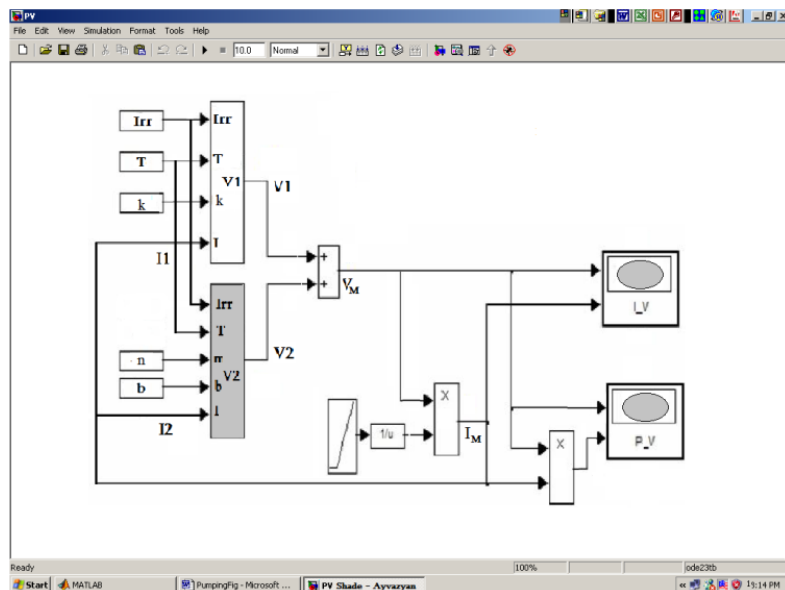
որտեղ I_1 -ը, I_2 -ն և V_1 -ը, V_2 -ն համապատասխանաբար նորմալ և ստվերված ԱԷ-երի հոսանքները և լարումներն են, որոնք որոշվում են (2) արտահայտությամբ, երբ.

$$R_{s1} = kR_s, R_{s2} = nR_s, R_{sh1} = kR_{sh}, R_{sh2} = nR_{sh}, I_{01} = I_{02} = I_0,$$

$$I_{ph1} = \frac{I_{rr}}{I_{rr}^*} I_{ph}^* [1 + \alpha_T (T - T_0)], I_{ph2} = \frac{I_{rr}}{I_{rr}^*} I_{ph}^* \frac{\beta}{100} [1 + \alpha_T (T - T_0)]:$$

Այստեղ “1” և “2” ենթատողային ինդեքսները համապատասխանաբար վերաբերում են նորմալ և մասնակիորեն ստվերված տիպայիններին, I_{rr} -ն արևային ճառագայթման ինտենսիվությունն է, I_{rr}^* -ի և I_{ph}^* -ն՝ համապատասխանաբար արևային ճառագայթման ինտենսիվությունը և ֆոտոհոսանքը ստանդարտ պայմաններում, β -ն՝ լույսի թափանցելիության գործակիցը տոկոսներով ($\beta = 100\%$ - ԱԷ-ն ստվերված չէ, $\beta = 0\%$ - ԱԷ-ն անթափանց է լույսի համար), α_T -ն՝ հոսանքի ջերմաստիճանային գործակիցը, T -ն՝ աշխատանքային ջերմաստիճանը, T_0 - ն՝ սենյակային ջերմաստիճանը:

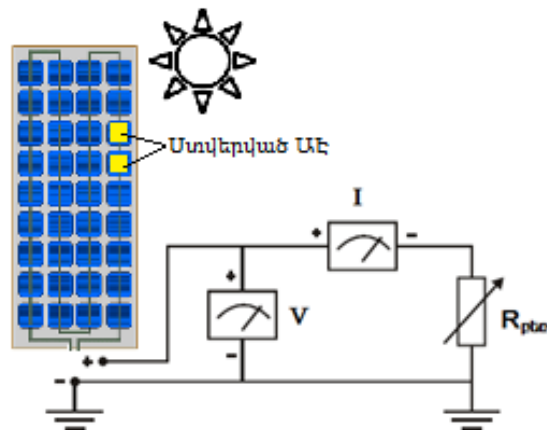
Մասնակիորեն ստվերված արևային մոդուլների բնութագրերի մոդելավորման համար կիրառվել է MatLab-Simulink ծրագրային միջավայրը: Մշակված Simulink մոդելը բերված է նկ. 2-ում: Այն թույլ է տալիս մոդելավորել մոդուլի էլքային հզորության և վոլտամպերային բնութագրերը՝ կախված լույսի թափանցելիության գործակցից, շրջապատի ջերմաստիճանից, ստվերացված ԱԷ-երի քանակից և ճառագայթման ինտենսիվությունից:



Նկ. 2. Ստվերված արևային մոդուլի Simulink մոդելը

Մոդուլների փորձնական հետազոտություններն իրականացվել են դաշտային պայմաններում բնական լույսի տակ: Հետազոտական սարքավորման սխեմատիկ պատկերը ցույց է տրված նկ. 3-ում: Լարման և հոսանքի չափումներն իրականացվել

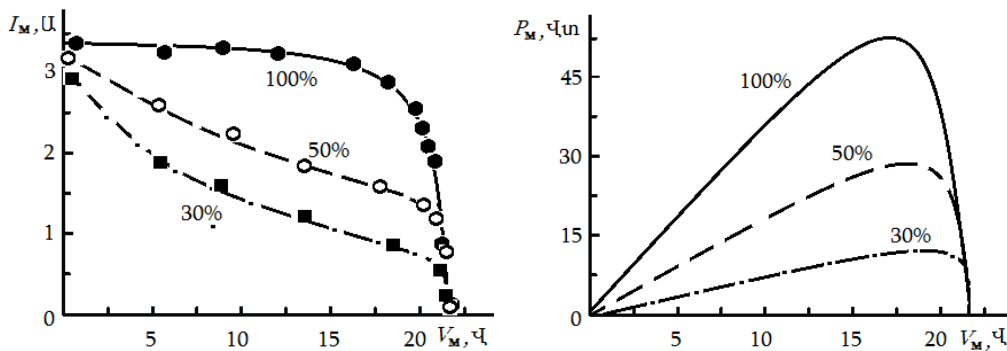
են փոփոխական R_{ptc} դիմադրությամբ բեռով՝ վոլտմետրի և ամպերմետրի միջոցով: Փորձերի ընթացքում տարբեր հաստության մոմաթղթերով և մուգ ցանցային կտորով մասնակիորեն ստվերվել է առնվազն մեկ ԱԷ-ի մակերևույթը:



Նկ. 3. Հետազոտական սարքավորման սխեմատիկ պատկերը

Արևային մոդուլների բնութագրերի մոդելավորումը և փորձնական հետազոտումն իրականացվել են 36 հատ հաջորդաբար միացված սիլիցիումային ԱԷ-երից բաղկացած կոմերցիոն նշանակությամբ արևային մոդուլների համար, որոնց շրջանցող (bypass) դիոդները ապամոնտաժված էին:

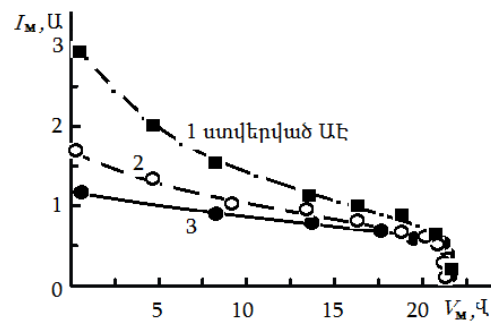
Նկ. 4-ում ցույց են տրված մեկ ստվերված ԱԷ-ով ($n=1$) արևային մոդուլի հաշվարկային ՎԱԲ-երը, ելքային հզորության կորերը և չափումների արդյունքները երեք տարբեր ստվերման աստիճանների դեպքում՝ $\beta = 100, 50$ և 30% :



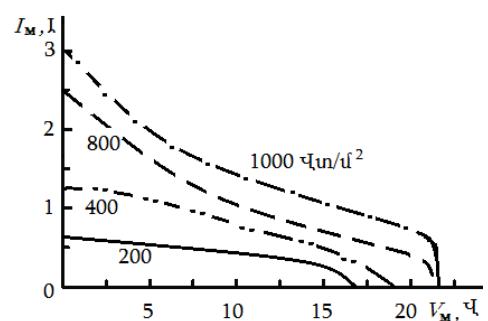
Նկ. 4. Մեկ ստվերված ԱԷ-ով արևային մոդուլի վոլտամպերային և հզորության բնութագրերը

Ինչպես երևում է ներկայացված բնութագրերից, ստվերված ԱԷ-ի առկայությունը հանգեցնում է ՎԱԲ-րի տեսքի դեֆորմացիային և էլքային հզորության կորուստների: Լույսի թափանցելիության գործակիցի փոքրացմանը զուգընթաց նկատելիորեն փոքրանում է մոդուլի կարճ միացման հոսանքը, իսկ պարապ ընթացքի լարումը գրեթե մնում է անփոփոխ:

Նկ. 5-ում բերված են արևային մոդուլի հաշվարկային ՎԱԲ-երը և չափումների արդյունքները՝ ստվերված ԱԷ-երի տարբեր քանակների համար՝ $n = 1, 2$ և 3 ($\beta = 30\%$ արժեքի դեպքում): Հաշվարկային ՎԱԲ-երը I_{rr} ճառագայթման ինտենսիվության տարբեր արժեքների դեպքում ներկայացված են նկ. 6-ում ($n = 1$ և $\beta = 30\%$):



Նկ. 5. Արևային մոդուլի ՎԱԲ-երը՝ ստվերված ԱԷ-երի տարբեր քանակների համար



Նկ. 6. Արևային մոդուլի ՎԱԲ-երը՝ ճառագայթման ինտենսիվության տարբեր արժեքների դեպքում

Ստվերված ԱԷ-երի քանակի ավելացումը կտրուկ փոքրացնում է արևային մոդուլի կարճ միացման հոսանքը՝ աննշան փոքրացնելով պարապ ընթացքի լարումը: Ինտենսիվության նվազումը հանգեցնում է արևային մոդուլի ինչպես կարճ միացման հոսանքի, այնպես էլ պարապ ընթացքի լարման փոքրացմանը:

Աղյուսակում խմբավորված են դիտարկված դեպքերի համար ստվերման հետևանքով արևային մոդուլների էլքային հզորությունների կորուստների արժեքները, որոնք գնահատվել են հետևյալ բանաձևով.

$$\mu = \frac{P_{mn} - P_{ms}}{P_{mn}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

որտեղ P_{mn} և P_{ms} -ն համապատասխանաբար նորմալ և ստվերված մոդուլների առավելագույն հզորություններն են:

Արևային մոդուլների հզորության կորուստները

N	Արևային մոդուլի նկարագիրը	Հզորության կորուստը, μ (%)
1	Նորմալ ԱԷ-երով ($n=0$ և $\beta=100\%$)	0
2	Մեկ ստվերված ԱԷ-ով ($n=1$ և $\beta=50\%$)	64,38
3	Մեկ ստվերված ԱԷ-ով ($n=1$ և $\beta=30\%$)	75,23
4	Երկու ստվերված ԱԷ-երով ($n=2$ և $\beta=30\%$)	76,58
5	Երեք ստվերված ԱԷ-երով ($n=3$ և $\beta=30\%$)	77,42

Աղյուսակից հետևում է, որ արևային մոդուլների նույնիսկ մեկ ԱԷ-ի մասնակիորեն ստվերումը հանգեցնում է հզորության զգալի կորուստների, ընդ որում, կորուստները համարժեք չեն ստվերված մակերևույթի մակերեսին: Այսպես, մեկ ստվերված ԱԷ-ն (ընդհանուր մակերեսի 2,77%-ը) ուղեկցվում է 65...75 % հզորության կորուստներով: Ստվերված մակերևույթի մակերեսի կրկնապատումը կամ եռապատումը հզորության կորուստները մեծացնում են աննշան չափով:

Վերջում անհրաժեշտ է նշել տեսական և փորձնական արդյունքների բավարար համապատասխանությունը, որը տվյալ դեպքում վկայում է մշակված Simulink մոդելի մեծ ճշտության մասին:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Shen W.X.** Optimally Sizing of Solar Array and Battery in a Standalone Photovoltaic System // Renewable Energy. - 2009.-34 (1).- P. 348–352.
2. **Manju B. Sree, Ramaprabha R., Mathur B.L.** Design and Modeling of Standalone Solar Photovoltaic Charging System // Int. J. of Computer Appl.- 2011.- 18, 2.- P. 41-47.
3. **Pachpande S.G., Zope H.P.** Studying the Effect of Shading on Solar Panel using MATLAB // Int. J. of Sci. and Appl. Inf. Technology.- 2012. -1, 2. – P. 46-51.
4. **Kubba Z.M.** Analysis of Partially Shaded PSPICE - PV Modules for Series- Parallel and TCT Configuration // J. of Al-Nahrain University.- 2013. - 16 (4).- P.94-100.
5. **Chihong Park, Nari Yoon.** Numerical Analysis of Si-based Photovoltaic Modules with Different Interconnection Methods // Transaction on Electrical and Electronic Materials.- 2014.-15, 2.- P. 103-111.
6. **Kaushika N., Gautam N.** Energy Yield Simulations of Interconnected Solar PV Arrays // IEEE Transactions on Energy Conversion.- 2003.- 18, N 1.- P. 127–134.
7. **Kawamura H., Naka K., Yonekura N., Ohno H.** Simulation of I-V Characteristics of a PV Module with Shaded PV Cells // Solar Energy Materials & Solar Cells.- 2003.- 75.- P. 613–621.
8. **Bishop J.W.** Computer Simulation of the Effects of Electrical Mismatches in Photovoltaic Cell Interconnection Circuits// Solar Cells.-1988.-25.- P. 73–89.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 11.02.2015:

К.Г. АЙВАЗЯН, С.Х. ХУДАВЕРДЯН

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНО
ЗАТЕНЕННЫХ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ**

Экспериментально исследованы и на основе модели Bishop смоделированы вольт-амперные и мощностные характеристики частично затененных солнечных станций. Показано, что уменьшение выходной мощности этих станций непропорционально площади затененной поверхности.

Ключевые слова: солнечный модуль, характеристика, затененная поверхность, потеря мощности.

K.G. AYVAZYAN, S.K. KHUDAVERDYAN

**MODELING AND INVESTIGATING THE CHARACTERISTICS OF PARTIALLY
SHADED SOLAR MODULES**

I-V and P-V characteristics of partially shaded solar modules have experimentally been investigated and modeled based on the Bishop model. It is shown that the decrease in the power production of such solar modules is not proportional to the area of the shaded surface.

Keywords: solar module, characteristic, shaded surface, power loss.

Գ.Ռ. ՄԱՐԴՈՅԱՆ, Ժ.Մ. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ

ԿՈՂԱՅԻՆ ՏԱՐԱՆՋԱՏՄԱՄԲ ՎԱՐԺԵՑՆՈՂ ԱԶԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ
ՕԳՏԱԳՈՐԾՈՒՄՈՎ ԲԱԶՄԱԿԻ ՄՈՒՏՔԵՐՈՎ ԵՎ ԲԱԶՄԱԿԻ ԵԼՔԵՐՈՎ (MIMO)
ԿԱՊՈՒՂՈՒ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿ

Առաջարկվում է MIMO համակարգերի համար կապուղու գնահատման նոր եղանակ, որը հիմնված է ուղղակի հաջորդականությամբ սպեկտրի լայնացման DSSS (անգլ. direct sequence spread spectrum) եղանակով կազմավորված վարժեցնող ազդանշանների օգտագործման վրա: Առաջարկված եղանակը թույլ է տալիս կրճատել անհրաժեշտ վարժեցնող ազդանշանների տևողությունը, պարզեցնել ընդունիչում կատարվող կապուղու գնահատման գործընթացը, ինչպես նաև բարձրացնել կապուղու գնահատման ճշտությունը:

Առանցքային բառեր. MIMO, DSSS, կապուղու գնահատում:

Ներածություն: Ժամանակակից անլար կապի ոլորտը դժվար է պատկերացնել առանց բազմակի մուտքերով և բազմակի ելքերով (անգլ. multiple-input multiple-output, MIMO) համակարգերի, որոնք օգտագործում են բազմաթիվ հաղորդիչ և ընդունիչ անտենաներ՝ կամ լրացուցիչ խանգարումակայունություն, կամ կապուղու ավելի մեծ թողունակություն ապահովելու համար:

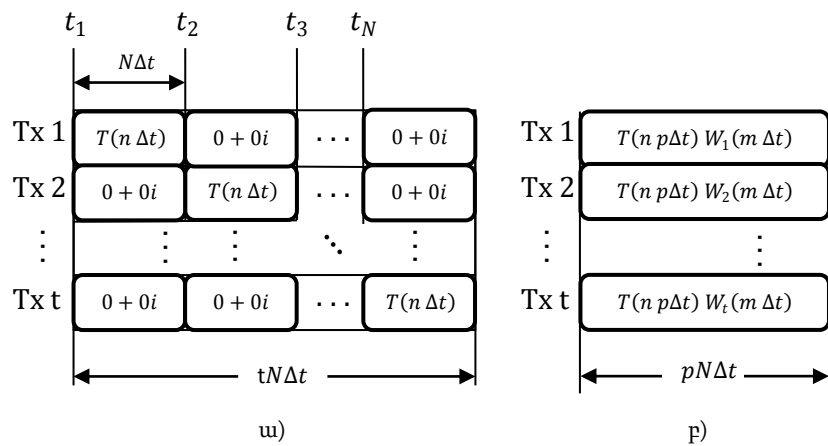
MIMO կապի համակարգի ընդունման ծայրում ստացված ազդանշանները ապակոդավորելու համար անհրաժեշտ է լինում նախապես ունենալ MIMO կապուղու փոխանցման գործակիցները, այսպես կոչված, H մատրիցը, որի յուրաքանչյուր h_{ij} անդամ պարունակում է տեղեկություն այն մասին, թե ինչպիսին է կապուղու կոմպլեքս փոխանցման գործակիցը j -րդ հաղորդիչ և i -րդ ընդունիչ անտենաների միջև: H մատրիցը գնահատվում է ընդունիչում, հաղորդիչներից ստացված վարժեցնող ազդանշանների հիման վրա:

Հիմնականում վարժեցնող ազդանշանները որոշակի կոմպլեքս սիմվոլների հաջորդականություններ են, որոնք ունեն լավ ինքնակոռելացիոն հատկություններ: Տարբեր հաղորդիչների վարժեցնող ազդանշանները հաղորդվում են այնպես, որ դրանց միջև ինտերֆերենցը լինի նվազագույն: Դա կատարվում է վարժեցնող ազդանշանների ժամանակային [1] կամ հաճախային տարանջատման շնորհիվ [2]:

Ժամանակային տարանջատման (անգլ. time division, TD) դեպքում տարբեր անտենաներից հաղորդվող վարժեցնող ազդանշանները հաջորդում են միմյանց (նկ. 1ա): Հաճախային տարանջատման դեպքում վարժեցնող ազդանշանները հաղորդվում են

տարբեր կրողների վրա: Վերջերս շատ մեծ տարածում ստացած MIMO-OFDM համակարգերում վարժեցնող ազդանշանները հաղորդվում են տարբեր ենթակրողներով:

Սակայն վերը նշված եղանակներն ունեն թերություններ: Մասնավորապես՝ վարժեցնող ազդանշանների ժամանակային տարանջատման (TD) դեպքում կապուղու ունակության զգալի տոկոսը ծախսվում է զուտ ծառայողական ինֆորմացիա հաղորդելու համար: Վարժեցնող ազդանշանների հաճախային տարանջատման դեպքում պահանջվում են ավելի շատ հաշվողական ռեսուրսներ, քանի որ վարժեցնող ազդանշանները միմյանցից տարանջատելու համար անհրաժեշտ է կիրառել կամ բավականին բարձր կարգի թվային գտում, կամ OFDM մոդուլման դեպքում՝ Ֆուրյեի արագ ձևափոխություն [1]:



Նկ. 1. Վարժեցնող ազդանշանները՝ ա) ժամանակային տարանջատմամբ (TD) հաջորդականություններով, բ) DSSS հաջորդականություններով

Դիտարկված կապուղու գնահատման եղանակը հիմնված է վարժեցնող ազդանշանների կողային տարանջատման վրա և զերծ է վերը նշված երկու եղանակների թերություններից. այն չի պահանջում հաղորդման մեծ տևողություն, քանի որ բոլոր վարժեցնող ազդանշանները հաղորդվում են միաժամանակ և պահանջում ավելի քիչ հաշվողական ռեսուրսներ, քանի որ կապուղու գնահատումը կատարվում է պարզագույն բազմապատկման և միջինացման գործողություններով

DSSS մոդուլված վարժեցնող ազդանշանների ձևավորումը: Դիտարկենք $T(np\Delta t)$ վարժեցնող դիսկրետ հաջորդականությունը, որը բաղկացած է N/p սիմվոլներից, որտեղ $n = 1, 2, 3, \dots, N/p$: Այդ հաջորդականության DSSS մոդուլման համար անհրաժեշտ են լայնացնող կոդեր [3], որոնց սիմվոլային արագությունը մի քանի անգամ մեծ է T հաջորդականության սիմվոլային $F_T = 1/p\Delta t$ արագությունից: Լայ-

նացնող կոդերը նշանակենք $W_i(m\Delta t)$, որտեղ $m = 1, 2, 3, \dots, N$: T և W_i հաջորդականությունների տևողությունները նույնն են և հավասար $N\Delta t$ -ի: Ցրող հաջորդականության սիմվոլային արագությունը, համապատասխանաբար, հնարավոր կլինի արտահայտել հետևյալ կերպ.

$$F_W = pF_T = 1/\Delta t, \quad (1)$$

որտեղ p -ն DSSS լայնացման գործակիցն է:

Լայնացնող կոդերը միմյանց նկատմամբ պետք է լինեն օրթոգոնալ՝

$$\sum_{m=1}^{2N} W_i(m\Delta t) W_j(m\Delta t) = 0, i \neq j: \quad (2)$$

Դիտարկենք $t \times r$ MIMO համակարգ, որն ունի t հաղորդիչ և r ընդունիչ անտենաներ: Օրթոգոնալ լայնացնող կոդերի քանակը այդ դեպքում հավասար է t -ի:

Որպեսզի ստանանք հաղորդիչ անտենաներից հաղորդվող վարժեցնող հաջորդականությունները, անհրաժեշտ է լայնացնել T վարժեցնող ազդանշանը համապատասխան օրթոգոնալ կոդով՝

$$T_i(m \Delta t) = T(n p \Delta t) W_i(m \Delta t): \quad (3)$$

Բոլոր t հաղորդիչ անտենաների վարժեցնող հաջորդականությունները հաղորդվում են միաժամանակ (նկ. 1բ):

Վապուղու գնահատման եղանակը և դրա սխալանքը: Ընդունված MIMO ազդանշանը նկարագրվում է հետևյալ արտահայտությամբ.

$$Y = HX + N, \quad (4)$$

որտեղ X -ը հաղորդված ազդանշաններից կազմված սյուն - մատրից է, որի տողերի քանակը հավասար է հաղորդիչների t թվին, Y -ը՝ ընդունված ազդանշաններից կազմված սյուն - մատրիցը, որի տողերի քանակը հավասար է ընդունիչների r թվին, H -ը՝ կապուղու գործակիցների $t \times r$ - չափանի մատրիցը, իսկ N -ը՝ ընդունված աղմուկներից սյուն - մատրիցը:

Վարժեցնող ազդանշանների հաղորդման դեպքում այս արտահայտությունը բերվում է հետևյալ տեսքի (ստորև բերված արտահայտությունները դիտարկվելի դարձնելու նպատակով վարժեցնող և ցրող հաջորդականությունների նշանակումներում $(n p \Delta t)$ և $(m \Delta t)$ արգումենտները բաց են թողնվում)՝

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1t} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{r1} & h_{r2} & \cdots & h_{rt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_r \end{pmatrix}: \quad (5)$$

Դիտարկենք առաջին ընդունիչ անտենայի ստացած ազդանշանը.

$$Y_1 = h_{11}T_1 + h_{12}T_2 + \dots + h_{1t}T_t + n_1: \quad (6)$$

T_i ազդանշանները փոխարինենք համաձայն (3)-րդ արտահայտության և հավասարման երկու կողմերը բազմապատկենք W_1 լայնացնող հաջորդականությամբ.

$$W_1 Y_1 = h_{11}T W_1 W_1 + h_{12}T W_2 W_1 + \dots + h_{1t}T W_t W_1 + n_1 W_1: \quad (7)$$

Հավասարման երկու կողմերը բաժանենք ընդունիչում հայտնի T հաջորդականության վրա.

$$\frac{W_1 Y_1}{T} = h_{11}W_1 W_1 + h_{12}W_2 W_1 + \dots + h_{1t}W_t W_1 + \frac{n_1 W_1}{T}: \quad (8)$$

Այժմ գտնենք հավասարման աջ մասի միջին արժեքը: Հաշվի առնելով տարածող հաջորդականությունների օրթոգոնալության պայմանը՝ արտահայտությունը կընդունի հետևյալ տեսքը.

$$\overline{\left(\frac{W_1 Y_1}{T}\right)} = h_{11} + \frac{1}{pN} \sum_{m=1}^{pN} \frac{n_1(m)W_1(m)}{T(m)}, \quad (9)$$

որտեղ $n_1(m)$ -ը, $W_1(m)$ -ը և $T(m)$ -ը համապատասխանաբար n_1 աղմուկի վեկտորի, W_1 օրթոգոնալ կոդի վեկտորի և T վարժեցնող հաջորդականության վեկտորի m -րդ տարրերի արժեքներն են: (9) արտահայտությունը ինքնին հանդիսանում է կապուղու h_{11} պարամետրի գնահատականը:

$$\hat{h}_{11} = \overline{\left(\frac{W_1 Y_1}{T}\right)} = h_{11} + \frac{1}{pN} \sum_{m=1}^{pN} \frac{n_1(m)W_1(m)}{T(m)}: \quad (10)$$

Նույն կերպ կարելի է արտածել H մատրիցի ցանկացած տարրի արժեքը՝

$$\hat{h}_{ij} = \overline{\left(\frac{W_j Y_i}{T}\right)} = h_{ij} + \frac{1}{pN} \sum_{m=1}^{pN} \frac{n_i(m)W_j(m)}{T(m)}, \quad (11)$$

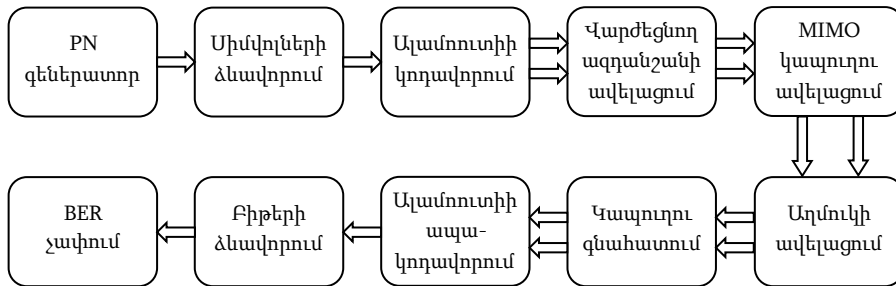
որտեղից երևում է, որ ընդունիչում գնահատված h_{ij} -ի բացարձակ սխալանքը հավասար է՝

$$\Delta h_{ij} = \frac{1}{pN} \sum_{m=1}^{pN} \frac{n_i(m)W_j(m)}{T(m)}: \quad (12)$$

Ինչպես երևում է (12)-ից, սխալանքը կախված չէ հաղորդիչ և ընդունիչ անտենաների քանակից: Իսկ դա նշանակում է, որ մեծ թվով հաղորդիչ անտենաների դեպքում, նույնիսկ երբ սպեկտրալ լայնացման p գործակիցը հավասար է երկուսի, $2N$

սիմվոլ պարունակող վարժեցնող հաջորդականությունը բավարար կլինի կապուղու հաղորդման կոմպլեքս գործակիցները գտնելու համար, այն դեպքում, երբ ժամանակային տարանջատմամբ (TD) վարժեցնող հաջորդականություններով գծային փոքրագույն քառակուսիների մեթոդի (անգլ. linear least squares estimation, LLSE) աշխատանքի համար կպահանջվեր tN սիմվոլ պարունակող վարժեցնող ազդանշան:

Ծրագրային մոդելավորման արդյունքները: Առաջարկված եղանակի արդյունավետությունը ստուգելու համար այն համեմատվել է TD վարժեցնող ազդանշանների հաղորդման վրա հիմնված գծային միջին քառակուսիների եղանակի (LLSE) (կամ, այլ կերպ ասած, առավելագույն արժանահավաստության (ML) եղանակի հետ) [4][5]: Ստուգվել է այդ եղանակների աշխատանքը 2×2 MIMO համակարգում, որում սիմվոլները կոդավորվում են ըստ Ալամոուտիի տարածա-ժամանակային բլոկային կոդի [6]: Ծրագրային համակարգի կառուցվածքը բերված է նկ. 2-ում:



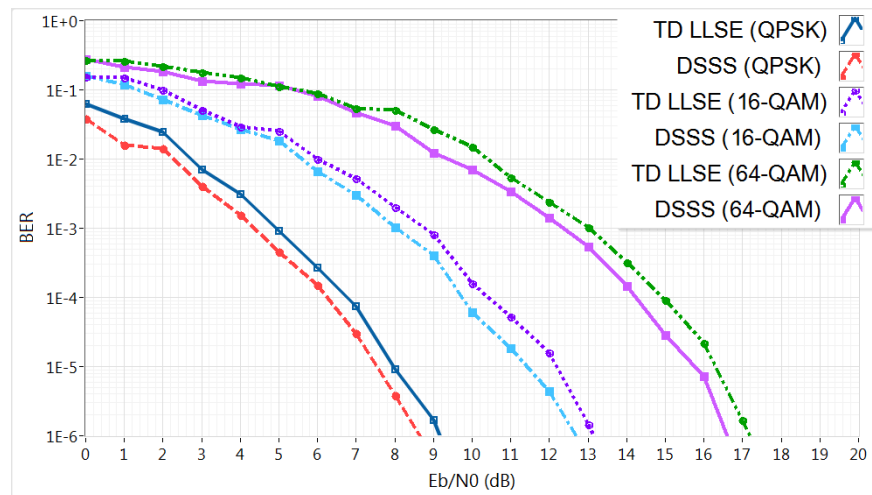
Նկ. 2. Կապուղու գնահատման եղանակների ստուգման ծրագրային մոդելի կառուցվածքային սխեման

Փսևդո-պատահական PN գեներատորից հաղորդված բիթերը վերածվում են սիմվոլների, համաձայն QPSK, 16-QAM կամ 64-QAM մոդուլման եղանակների, այնուհետև կոդավորվում են Ալամոուտիի տարածա-ժամանակային բլոկային կոդով [6]: Վարժեցնող ազդանշանների ավելացում բլոկում տվյալների հոսքի դիմացից տեղադրվում են վարժեցնող հաջորդականությունները: Գծային փոքրագույն քառակուսիների եղանակով կապուղու գնահատման համար օգտագործվում են նկ. 1-ում պատկերված վարժեցնող հաջորդականությունները, իսկ առաջարկված եղանակով կապուղին գնահատելու համար ավելացվում են (3) արտահայտության համաձայն ձևավորված ազդանշանները: Ձևավորված փաթեթն անցնում է 2×2 MIMO կապուղու միջով, որը նկարագրող H մատրիցի կոմպլեքս արժեքները ձևավորվում են պատահական թվերի գեներատորի միջոցով: Ընդունման ծայրում ընդունված MIMO ազդանշանին ավելացվում է սպիտակ գաուսյան աղմուկ, որից հետո ազդանշանները տրվում են կապուղու գնահատման բլոկին: Այնտեղ, կախված ընտրված մեթոդից,

գնահատվում է H մատրիցը և փոխանցվում Ալամոուտիի ապակողավորիչին: Ապակողավորված սիմվոլները վերածվում են բիթերի և տրվում հաջորդ բլոկին՝ սխալ բիթերի (անգլ. bit error rate) գործակիցը գտնելու համար:

Ծրագրային մոդելավորումն իրականացվել է LabVIEW ծրագրավորման միջավայրում: Օգտագործվել է TD LSSE եղանակի վրա հիմնված MIMO ծրագրային պատրաստի մոդել՝ ներբեռնված [7] աղբյուրից: MIMO կապուղու և աղմուկների ավելացումը կատարվում է համաձայն [8] աղբյուրի:

Նկ. 3-ում պատկերված կորերը ցույց են տալիս նկ. 2-ում բերված համակարգի խանգարումակայունությունը, երբ միևնույն պայմաններում օգտագործվել է TD LSSE եղանակը կամ DSSS վարժեցնող հաջորդականությունների վրա հիմնված եղանակը:



Նկ. 3. Բիթային սխալանքների գործակիցի (BER) կախվածությունը միավոր հաճախային շերտում ազդանշան - աղմուկ հարաբերությունից (E_b/N_0)

Եզրակացություն: Վերը բերված կորերից (նկ. 3) կարելի է տեսնել, որ առաջարկված եղանակը թույլ է տալիս հասնել որոշակի առավելության TD LSSE եղանակի նկատմամբ: Մասնավորապես, QPSK մոդուլման դեպքում նույն BER-ը ստանալու համար առաջարկված եղանակը պահանջում է մոտավորապես 0,5 μW ավելի քիչ ազդանշան-աղմուկ հարաբերություն, քան TD LSSE եղանակը: 64-QAM մոդուլման դեպքում այդ տարբերությունը տատանվում է 0,7 μW արժեքի շուրջը: Անհրաժեշտ է նշել, որ դիտարկված 2×2 MIMO համակարգում, որտեղ լայնացման p գործակիցը ընտրվել է հավասար 2-ի, երկու եղանակների վարժեցնող ազդանշանների տևողությունները նույնն են: Հետևաբար, նույն խանգարումակայունությունն ապահովելու համար DSSS վարժեցնող ազդանշաններով եղանակն ունի ավելի կարճ հաջորդականությունների կարիք, քան TD LSSE եղանակը: Առաջարկված եղանակը

հնարավոր է կիրառել արագ փոփոխվող անլար MIMO կապուղիների գնահատման համար, երբ կարևոր է, որ H մատրիցի բոլոր չափված արժեքները ներկայացնեն կապուղու վիճակը միննույն ժամանակահատվածի ընթացքում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Minn H.** Optimal training signals for MIMO OFDM channel estimation // *Global Telecommunications Conference*, Nov.-3 Dec. 2004.-2004.-Vol. 1, no. 29.- P. 219-224.
2. **Lee W., Sieskul B., Kunaruttanapruk S., Jitapunkul S.** Optimum training sequences for the uplink of MIMO MC-CDMA systems // *Communication Networks and Services Research Conference*, 2005: Proceedings of the 3rd Annual, 16-18 May 2005.-2005.- P. 223-228.
3. **Schulze H., Luders C.** Theory and Applications of OFDM and CDMA.-England: John Wiley & Sons Ltd: Chichester, West Sussex PO19 8SQ, 2005.- P. 265-312.
4. **Biguesh M., Gershman A.B.** MIMO channel estimation: optimal training and tradeoffs between estimation techniques // *IEEE International Conference on Communications*, 20-24 June 2004.-2004.-Vol. 5.- P. 2658-2662.
5. **Fragouli C., Al-Dhahir N., Turing W.** Training-based channel estimation for multiple-antenna broadband transmissions // *IEEE Transactions on Wireless Communications*.- March 2003.- Vol. 2, no. 2.- P. 384-391.
6. **Alamouti S.** A simple transmit diversity technique for wireless communications // *Selected Areas in Communications*.- 2002.- Vol. 16, no. 8.- P. 1451-1458.
7. **Shearman S.** 2x2 MIMO QAM with Alamouti Coding, National Instruments, 18 March 2012. [Online]. Available: <https://decibel.ni.com/content/docs/DOC-21751>.
8. **Հովսեփյան Ժ.Մ., Մարդոյան Գ.Ռ.,** Անլար բազմուղի կապի համար ազդանշանների տարածման միջավայրի ծրագրային մոդել LabVIEW փաթեթում // ՀՊՃՀ (Պոլիտեխնիկ) Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու.- Երևան, 2014.- Մաս 1.- էջ 269-274:

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 11.02.2015:

Г.Р. МАРДОЯН, Ж.М. ОВСЕПЯН

**МЕТОД ОЦЕНКИ КАНАЛА С МНОЖЕСТВЕННЫМИ ВХОДАМИ И
МНОЖЕСТВЕННЫМИ ВЫХОДАМИ (MIMO) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ТРЕНИРОВОЧНЫХ СИГНАЛОВ С КОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ**

Предложен новый метод оценки канала для MIMO систем, который основан на использовании тренировочных сигналов, образованных с помощью расширения спектра методом прямой последовательности (DSSS, англ. direct sequence spread spectrum). Предложенный метод позволяет сократить необходимую длительность тренировочных сигналов, упростить процесс оценки канала в приемнике, а также повысить точность оценки канала.

Ключевые слова: MIMO, DSSS, оценка канала.

G.R. MARDOYAN, J.M. HOVSEPYAN

**A MULTIPLE-INPUT MULTIPLE-OUTPUT (MIMO) CHANNEL ESTIMATION
METHOD BY TRAINING SIGNALS WITH CODE-DIVISION**

A new MIMO channel estimation method is proposed, which is based on training signals formed using the direct sequence spread spectrum method (DSSS). The proposed method allows to shorten the required duration of the training signals, simplify the process of channel estimation in the receiver, as well as increase the channel estimation accuracy.

Keywords: MIMO, DSSS, channel estimation.

М.С. АЗОЯН

**АНАЛИЗ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ДЕЛИТЕЛЯ
СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ**

Проведено исследование полупроводниковых параметрических делителей частоты (ППДЧ), базирующееся на представлении нелинейных зависимостей емкости и проводимости диода в виде конечных рядов по степеням напряжения. Показано, что более общим подходом является представление этих зависимостей в виде произвольных функций, которые могут быть заданы экспериментальными графиками. На основе такого представления приведены результаты анализа амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) полупроводниковых параметрических делителей частоты.

Ключевые слова: аппроксимация, параметрический делитель, субгармоника, вольт-амперная, вольт-кулоновая, амплитудно-частотная характеристики.

Введение. Рассматривается полупроводниковый параметрический делитель частоты [1], где р-п переход нагружен контурами частоты накачки и ее субгармоники. Для расчета полного спектра тока через нелинейные емкость и проводимость р-п перехода использован метод И.В. Басика [2-4].

Анализ АЧХ проведен по результатам решения нелинейного параметрического дифференциального уравнения с переменными коэффициентами n -го порядка, которое, как правило [5], не имеет общего решения. Практические инженерные расчеты проведены для частных случаев, когда $n = 2, 3, 4, \dots$

Методы исследования. Эквивалентная схема рассматриваемого ППДЧ представлена на рис.1, где L_1 и G_1 – параметры контура выходной частоты ω ; $C_{(u)}$ и $G_{(u)}$ – нелинейные емкость и проводимость полупроводникового р-п перехода, причем величины $C_{(u)}$ и $G_{(u)}$ определяются произвольно задаваемыми вольт-кулоновыми (ВКХ) и вольт-амперными (ВАХ) характеристиками этого контакта.

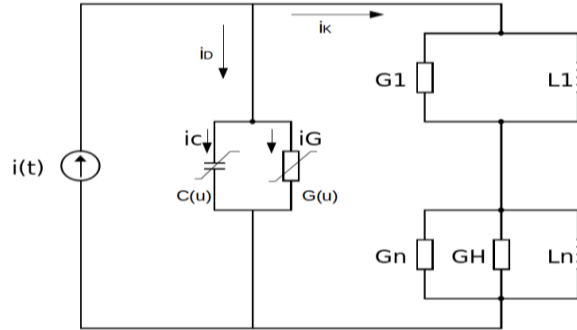


Рис. 1. Эквивалентная схема ППДЧ

Полагаем, что на р-п переход воздействуют постоянное напряжение U_0 , напряжение накачки U_1 и его субгармоники U_n :

$$U = U_0 + U_1 \cos n\omega t + U_n \cos(\omega t + \varphi). \quad (1)$$

Из полного спектра тока, полученного при воздействии на р-п переход напряжения, выбирается составляющая тока с выходной частотой, полученная за счет нелинейной емкости и проводимости р-п перехода, заданных ВКХ и ВАХ [2]:

$$I_{cn}(t) = -2\omega \sum_{p=0}^{\infty} I_{np+1} \left(U_n \frac{d}{dU_0} \right) I_p \left(U_1 \frac{d}{dU_0} \right) q(U_0) \sin[\omega t + (np + 1)\varphi] - \\ - 2\omega \sum_{p=1}^{\infty} I_{np-1} \left(U_n \frac{d}{dU_0} \right) I_p \left(U_1 \frac{d}{dU_0} \right) q(U_0) \sin[\omega t - (np - 1)\varphi]; \quad (2)$$

$$I_{Gn}(t) = 2\sum_{p=0}^{\infty} I_{np+1} \left(U_n \frac{d}{dU_0} \right) I_p \left(U_1 \frac{d}{dU_0} \right) i(U_{0o}) \cos[\omega t + (np + 1)\varphi] + \\ + 2\sum_{p=1}^{\infty} I_{np-1} \left(U_n \frac{d}{dU_0} \right) I_p \left(U_1 \frac{d}{dU_0} \right) i(U_{0o}) \cos[\omega t - (np - 1)\varphi]. \quad (3)$$

Определим проводимость р-п перехода, используя комплексное представление. Для этого в соотношениях (2) и (3) оставлены два члена разложения модифицированных функций Бесселя, в результате чего для комплексных проводимостей нелинейных элементов схемы на частоте субгармоники получены следующие уравнения:

$$\dot{Y}_{Cn} = \left(\frac{\omega A n}{2^{n-1}(n-1)!} U_1 U_n^{n-2} + \frac{\omega A_{n+2}}{2^{n+1}n!} U_1 U_n^n + \dots \right) \sin n\varphi + j \left[\omega \left(A_1 + \frac{A_3}{8} U_1^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{A_3}{4} U_n^2 + \dots \right) + \left(\frac{\omega A n}{2^{n-1}(n-1)!} U_1 U_n^{n-2} + \frac{\omega A_{n+2}}{2^{n+1}n!} U_1 U_n^n + \dots \right) \cos n\varphi \right]; \quad (4)$$

$$\dot{Y}_{Gn} = B_1 + \frac{B_3}{4} U_1^2 + \frac{B_3}{8} U_n^2 + \dots + \left(\frac{B n}{2^{n-1}(n-1)!} U_1 U_n^{n-2} + \frac{B_{n+2}}{2^{n+1}n!} U_1 U_n^n + \dots \right) \cos n\varphi + \\ + j \left(\frac{B n}{2^{n-1}(n-1)!} U_1 U_n^{n-2} + \frac{B_{n+2}}{2^{n+1}n!} U_1 U_n^n + \dots \right) \sin n\varphi, \quad (5)$$

где $A_n = d^n q(u) / dU^n |_{u=u_o}$; $B_n = d^n i(u) / dU^n |_{u=u_o}$; A_n и B_n – производные по напряжению, определяемые из ВКХ и ВАХ в рабочей точке $U = U_o$.

Для построения АЧХ выходного контура ППДЧ сумма проводимостей приравняется к нулю, в результате чего получены следующие соотношения:

$$G_{\Sigma n} + a_n X_n - (K_n b_n + K_{n+2} b_{n+2}) \sin n\varphi = 0; \quad (6)$$

$$X_n + a_n G_{\Sigma n} - (K_n b_n + K_{n+2} b_{n+2}) \cos n\varphi = 0, \quad (7)$$

где $G_{\Sigma n}$ – суммарная проводимость потерь; X_n – реактивная проводимость на частоте ω , которые выражаются уравнениями

$$G_{\Sigma n} = G_H + B_1 + \frac{B_3}{8} (2U_1^2 + U_n^2) = G + \frac{B_3}{8} (2U_1^2 + U_n^2); \quad (8)$$

$$X_n = \frac{1}{\omega L_n} \omega A_1 - \omega \frac{A_3}{8} (U_1^2 + 2U_n^2) = \omega A_1 \delta_0 - \omega \frac{A_3}{8} (U_1^2 + 2U_n^2); \quad (9)$$

$$K_n b_n = \frac{\omega A_n}{2^{n-1}(n-1)!} (1 - a_n) U_1 U_n^{n-2}; \quad (10)$$

$$K_{n+2} b_{n+2} = \frac{\omega A_{n+2}}{2^{n+1}n!} (1 - a_{n+2}) U_1 U_n^n. \quad (11)$$

Для упрощения в уравнениях (6)–(11) введены обозначения:

$$a_n = B_n / \omega A_n; b_n = \omega A_n - B_n; b_{n+2} = \omega A_{n+2} - B_{n+2}; \delta_0 = \frac{\omega_n}{\omega_1} - 1,$$

где $\alpha_n, b_n, b_{n+2}, K_n$ – расчетные коэффициенты; δ_0 – расстройка выходного контура.

Для получения уравнения, описывающего АЧХ ППДЧ, в соотношениях (6) и (7) исключаем фазу:

$$K_1^2 U_n^4 + \left(\frac{K_3}{K_1} Q_n \delta_n + \frac{K_2^2}{K_1^2} K_1 U_1^2 \right) K_1 U_n^2 + \frac{K_4^2}{K_1^2} K_1 U_1^4 + \\ + \left(\frac{K_5}{K_1} K_1 U_1^2 - K_6 \right) Q_n \delta_n + K_1 Q_n^2 \delta_n^2 = 0, \quad (12)$$

где $Q = \omega A / G$ – добротность контура.

Далее введем следующие обозначения: $X = Q_n \delta_n$ – относительная расстройка контура; $Y = k_1 U_n^2$ – амплитуда выходного сигнала; $Z = k_1 U_1^2$ – амплитуда накачки. В результате преобразования (12) по параметрам X, Y, Z получаем обобщенное уравнение для АЧХ ППДЧ:

$$Y^2 + \frac{k_4}{k_1} XY + \left(\frac{k_2^2}{k_1^2} Z + \frac{k_5}{k_1} \right) Y + k_8 X + k_7 (1 + X^2) + \frac{k_3^2}{k_1^2} Z^2 + \left(\frac{k_6}{k_1} X + \frac{k_7}{k_1} \right) Z - \frac{k_n^2 b_n^2}{k_1 k_1^{n-2}} Z Y^{n-2} - \\ - \frac{k_n b_n k_{n+2} b_{n+2}}{k_1 k_1^{n-1}} Z Y^{n-1} - \frac{k_{n+2}^2 b_{n+2}^2}{k_1 k_1^n} Z Y^n = 0, \quad (13)$$

но оно не имеет общего аналитического решения. Уравнение (13) для $n = 2, 3, 4$ может быть сведено к квадратному относительно искомого параметра Y . С учетом того, что при $n = 3$ последнее слагаемое становится гораздо меньше, чем самое малое слагаемое из остальных, а при $n = 4$ предпоследнее слагаемое меньше остальных, то упомянутыми малыми слагаемыми можно пренебречь. Поэтому для частных случаев АЧХ ППДЧ описываются уравнениями для кривых второго порядка.

Анализ частных случаев. Для дальнейшего анализа удобно сопоставить соотношение (13) с общим уравнением кривой второго порядка [6]:

$$aX^2 + 2bXY + cY^2 + 2dX + 2eY + f = 0, \quad (14)$$

где $a=1$; $b=\frac{k_3}{2k_1}$; $c=k_7$; $d=\frac{k_2^2}{2k_1^2}Z$; $e=\frac{1}{2}\left(\frac{k_5}{k_1}Z - k_6\right)$; $f=\frac{k_4^2}{k_1^2}Z^2 + 1$.

Форма кривых АЧХ зависит от инвариантов Δ , δ , s в соотношении (14):

$$\Delta = f\delta + 2bde - ae^2 - cd^2; \delta = ac - b^2; s = a + c. \quad (15)$$

Так как инварианты функции зависят от параметра Z , который может варьироваться в большом диапазоне значений, то в зависимости от соотношений инвариантов и выбранного напряжения в рабочей точке формой кривых АЧХ могут быть эллипс, парабола или гипербола [6].

Рассмотрим общие случаи для кривых в виде эллипса при $\delta_n > 0, s_n \Delta_n < 0$, гиперболы при $\delta_n < 0, \Delta_n \neq 0$, параболы при $\delta_n = 0, \Delta_n \neq 0$. Координаты центра гиперболы определяются из соотношений [5]

$$x_0 = \frac{be - dc}{\delta}; y_0 = \frac{bd - ac}{\delta}, \quad (16)$$

а угол поворота осей будет

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg\left(\frac{2b}{a-c}\right). \quad (17)$$

Координаты вершины кривой определяются решением уравнений

$$dx/dy = 0; dy/dx = 0, \quad (18)$$

полученных путем дифференцирования выражения (14).

В результате решения уравнения (14) относительно параметра y получим

$$y = \frac{-(bx+e) \pm \sqrt{(bx+e)^2 - c(ax^2 + 2dx + f)}}{c}. \quad (19)$$

Пусковые условия делителя получены на основе (18) из неравенства

$$-c(ax^2 + 2dx + f) > 0.$$

Решая (19) относительно параметра Z , можно определить пусковое значение $Z=Z_{\text{пуск}}$.

Устойчивую полосу частот деления ППДЧ можно определить из соотношений

$$X_{1,2} = X_0 \pm \sqrt{(be - dc)^2 + \delta \frac{b^2(e^2 - cf) - 4(be + dc)^2}{3\delta + ac}}, \quad (20)$$

$$Y_{1,2} = Y_0 \pm \sqrt{(bd - ac)^2 + \delta \frac{b^2(d^2 - af) - 4(bd + ac)^2}{3\delta + ac}}, \quad (21)$$

где X_0, Y_0 и δ описываются уравнениями (16) и (15) соответственно.

Определим области существования устойчивых режимов работы ППДЧ. Исследуем $\delta = f(a_n; b_3/c_3)$, для этого построим функцию $b_3/c_3 = f(a_n)$ при условии $\delta = 0$ и найдем области, где $\delta = 0, \delta > 0, \delta < 0$. Обозначив $b_3/c_3 = \mu$, получим параметрическую зависимость для расстройки контура, четко определяющую границы областей существования гиперболы, эллипса и параболы;

$$\delta = a_n^2 + 1 - \frac{[2(a_n^2 + a_n + 1) - \mu(a_n + 1)]^2}{4(a_n^2 + 1) - 4a_n\mu + \mu^2}. \quad (22)$$

График зависимости $\mu = f(a_n)$ представлен на рис.2.

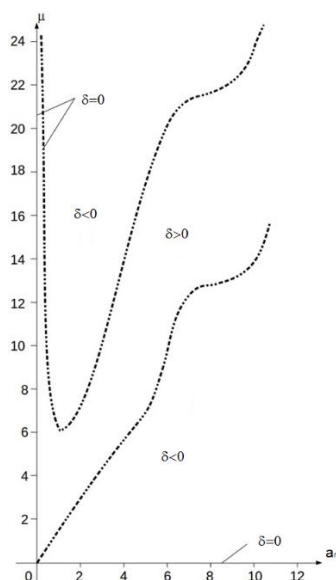


Рис. 2. Зависимость функции $\mu = f(a_n)$

Выводы. Установлено, что АЧХ ППДЧ в зависимости от накачки Z может быть в виде параболы, эллипса или гиперболы, что достигается сопоставлением полученного результата выходного сигнала (13) с уравнением кривой второго порядка. В результате исследования поведения инвариантов Δ, δ, s (15) определена функциональная зависимость $\mu = f(a_n)$, то есть области получения амплитудно-частотных характеристик ППДЧ в виде параболы, эллипса или гиперболы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мигулин В.В., Ильиновна Т.М. // Вестник МГУ. Серия физ-астрон. -1962.—№1.- С.55.
2. Басик И.В. Метод определения компонент тока при воздействии на нелинейную систему суммы синусоидальных напряжений //Сборник научных трудов ЦНИИС.- 1948.- С. 70-76.
3. Малышев В.А., Толоманенко А.Ф. Анализ параметрических устройств на нелинейной емкости с произвольной вольткулоновой характеристикой //Радиотехника. – 1975.-№7.-С.43-47.
4. Азоян М.С., Азоян Т.М. Анализ многочастотного воздействия сигнала на комплексную нелинейную проводимость контакта // Вестник ГИУА (Политехник). Серия “Информационные технологии, электроника, радиотехника”. -2014.- Вып. 17, №1.- С.87-91.
5. Андре Анго. Математика для электро- и радиоинженеров.- М.: Наука,1964.- 772 с.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 02.02.2015.

Մ.Ս. ԱԶՈՅԱՆ

ԳԵՐԲԱՐՁՐ ՀԱՃԱԽՈՒԹՅԱՄԲ ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴԱՅԻՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԻԿ ԲԱԺԱՆԻՉԻ ԱՄՊԼԻՏՈՒԴԱ-ՀԱՃԱԽԱՅԻՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Հաճախության կիսահաղորդչային բաժանարարի ուսումնասիրումը հիմնվում է դիոդի ոչ գծային ունակության և հաղորդականության կախվածության վրա՝ ըստ լարման վերջնական աստիճանային շարքերի պատկերման տեսքով: Առավել ընդհանուր մոտեցմամբ այդ կախվածությունները հանդես են գալիս անկախ ֆունկցիաների տեսքով, որոնք կարող են առաջադրվել փորձնական բնութագրերով: Այդ պատկերացման հիման վրա ներկայացված է գերբարձր հաճախությամբ կիսահաղորդչային պարամետրիկ բաժանարարի (ՀԿՊԲ) ամպլիտուդա – հաճախային վերլուծությունը (ԱՀՎ):

Առանցքային բառեր. ապրոքսիմացիա, պարամետրիկ բաժանարար, ենթահարմոնիկ, վոլտամպերային, վոլտ – կուլոնային, ամպլիտուդա – հաճախային բնութագրեր:

M.S.AZOYAN

**ANALYSIS OF THE AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF
SEMICONDUCTOR PARAMETRIC DIVIDER OF A MICROWAVE**

Semiconductor frequency dividers based on the representation of non-linear dependences of the diode capacitance and conductance in the form of finite power series in voltage are investigated. A more general approach is to view these dependences in the form of arbitrary functions that can be set by experimental schedules. Based on this representation the analysis results of the amplitude-frequency characteristics (AFC) of semiconductor-parametric frequency dividers (PPDCH) are introduced.

Keywords: approximation, parametric dividers, subharmonic, volt-ampere, volt-coulomb, amplitude-frequency characteristics.

Ա.Ա. ԱՂԱԶԱՆՅԱՆ

ՌԱԴԻՈ-ՀԱՃԱԽԱՅԻՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ՓՈԻԼԱՅԻՆ ՇԵՂՄԱՆ ԶԱՓՄԱՆ
ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏ ԵՂԱՆԱԿ

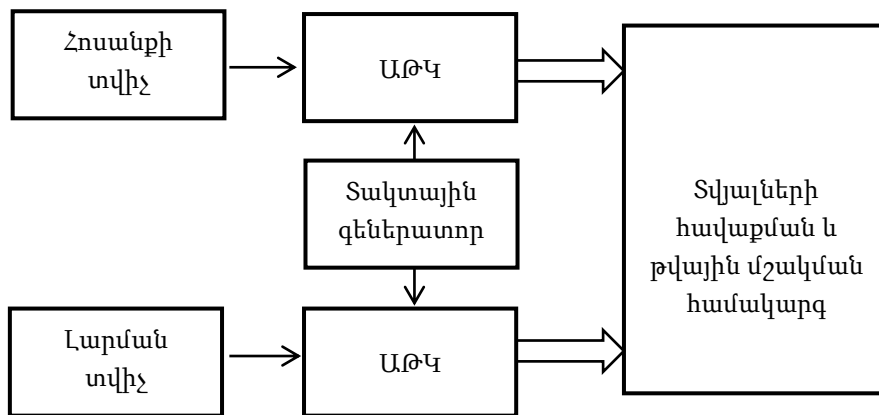
Հետազոտվել է Ֆուրյեի դիսկրետ ձևափոխության վրա հիմնված փուլային շեղման չափման եղանակի արդյունավետությունը: Կատարված ուսումնասիրությունները ցույց են տվել, որ Ֆուրյեի արագ ձևափոխության կիրառումը թույլ է տալիս օգտագործել ավելի ցածր գնային դասի անալոգա-թվանշանային կերպափոխիչ (ԱԹԿ)՝ առանց զգալիորեն նվազեցնելու չափման ճշգրտությունները:

Առանցքային բառեր. ռադիո-հաճախականային ազդանշան, փուլային շեղման չափում, Ֆուրյեի արագ ձևափոխություն, ազդանշանների թվային մշակում:

Նախաբան: Նյութերի պլազմային մշակումը համեմատաբար նոր մեթոդ է, որը կիրառվում է կիսահաղորդչային սարքերի արտադրության մեջ: Այս համակարգերում մի քանի *ՄՀ*-ից մինչև տասնյակ *ՄՀ* հաճախությամբ ռադիո-հաճախային ճառագայթմամբ, իներտ գազի գրգռման եղանակով ստացվում է ցածր ջերմաստիճանային պլազմա, որն էլ ծառայում է որպես մշակող միջոց: Կիսահաղորդչային սարքերի արտադրության մեջ լայն տարածում է գտել 13,56 *ՄՀ* հաճախության ճառագայթման կիրառումը [1]:

Պլազմային մշակման տարբեր փուլերում իրականացվում են տարաբնույթ տեխնոլոգիական գործընթացներ, որոնց արդյունքում հաճախ ոչ գծային օրենքով փոփոխվում է պլազմային մշակման խցիկի կոմպլեքս դիմադրությունը, որի արդյունքում խախտվում է ռադիո-հաճախային գեներատորի և պլազմային մշակման խցիկի դիմադրությունների համաձայնեցման պայմանը: Համակարգի ոչ համաձայնեցված լինելը հանգեցնում է փոխանցվող էներգիայի նվազման և պատճառ է դառնում համակարգի անկառավարելիության: Այս խնդրի լուծման նպատակով կիրառվում են հատուկ համաձայնեցնող շղթաներ, որոնք ադապտիվ կերպով փոխում են իրենց վիճակի պարամետրերը, դրանով իսկ ապահովելով շղթայի համաձայնեցման պայմանը: Համաձայնեցման հանգույցներում հաճախ կիրառվում են հետադարձ կապով միմիալացնող ալգորիթմներ: Հետադարձ կապի իրականացման նպատակով կիրառվում են կոմպլեքս դիմադրության չափման սարքեր, որոնց բնութագրերը զգալիորեն կախված են հոսանքի և լարման միջև եղած փուլային շեղման չափման ճշգրտությունից [2,3]:

Պլազմային մշակման համակարգերում ռադիո-հաճախային ազդանշանների փուլային շեղման եղանակով չափիչի կառուցվածքային սխեման բերված է նկ.1-ում:



Նկ. 1. Ռադիո-հաճախականային ազդանշանների փուլային շեղման թվային եղանակով չափիչի կառուցվածքային սխեման

Հոսանքի և լարման տվիչների ելքային անալոգային ազդանշանները փոխանցվում են ԱԹԿ-ներին, այնուհետև թվայնացված ազդանշանները փոխանցվում են ազդանշանների հավաքման և թվային մշակման համակարգին: Երկու հարմոնիկ ազդանշանների փուլային շեղման չափման համար անհրաժեշտ է որոշել երկու ազդանշանների զրոյական անցման կետերը և հաշվել նրանց տարբերությունն ըստ ժամանակի:

Ակնհայտ է, որ փուլային շեղման չափման ճշգրտությունը կախված է օգտագործված ԱԹԿ-ների կարգայնությունից և կերպափոխման հաճախությունից: Որպես կանոն, ավելի բարձր կարգայնության ԱԹԿ-ներն ունեն համեմատաբար ավելի ցածր կերպափոխման հաճախություն և հակառակը:

Սույն աշխատանքի նպատակն է հետազոտել փուլային շեղման թվային չափման եղանակների արդյունավետության կախվածությունը կիրառված ԱԹԿ-ների կարգայնությունից և կերպափոխման հաճախությունից՝ ազդանշանների թվային մշակման տարատեսակ եղանակների կիրառման դեպքում:

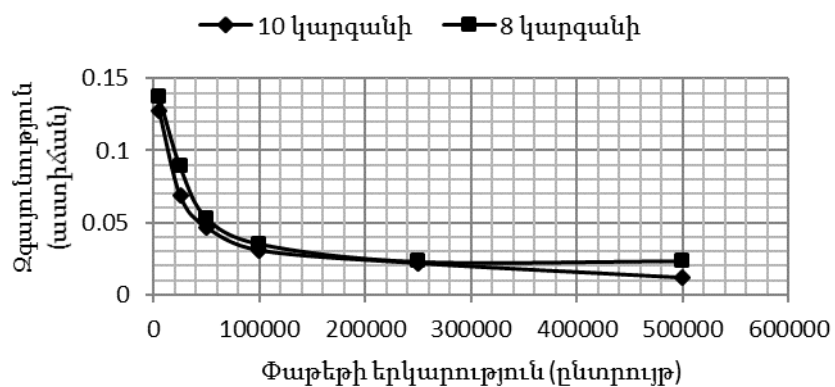
Փուլային շեղման չափումը ազդանշանների թվային մշակմամբ: Փուլային շեղման չափման զգայնության մեծացման նպատակով կիրառվում են ազդանշանների թվային մշակման այնպիսի եղանակներ, ինչպիսիք են ինտերպոլյացիան, սինուսոիդային մոտարկումը և Ֆուրյեի դիսկրետ ձևափոխությունը: Հաշվողական ռեսուրսների խնայման տեսանկյունից ամենաարդյունավետ եղանակը Ֆուրյեի արագ ձևափոխության վրա հիմնված եղանակն է [4]: Այն թույլ է տալիս իրականացնել ավելի արագ չափումներ, որը կարևոր գործոն է պլազմային մշակման համակարգերի համար: Հաշվի առնելով վերը նշվածը, որպես թվային մշակման եղանակ կիրառվել է Ֆուրյեի արագ ձևափոխությունը: Թվայնացման ոչ կոհերենտության արդյունքում առաջացած սխալներից խուսափելու նպատակով կիրառվել են նաև տարատեսակ կշռավորող պատուհաններ: Ֆուրյեի կոմպլեքս ձևափոխության միջոցով ստացվում

են հետազոտվող ազդանշանների փուլային սպեկտրները, որոնցից կարելի է գտնել բոլոր հաճախային բաղադրիչների սկզբնական փուլերը: Գտնելով երկու ազդանշանների հիմնական հաճախությունների սկզբնական փուլերը, կարելի է գտնել երկու ազդանշանների փուլային շեղումը: Չափման ճշգրտությունն այս եղանակի դեպքում զգալի կերպով կախված է հավաքված փաթեթում եղած կետերի քանակից: Կետերի քանակի մեծացումը հանգեցնում է ազդանշանի մշակման տևողության մեծացմանը: Ակնհայտ է, որ այս եղանակի արդյունավետությունը կախված է փաթեթում եղած կետերի քանակի և ԱԹԿ-ի կերպավորման հաճախության համադրությունից:

Չափումների նկարագրությունը: Չափումների նպատակով պատրաստվել է հատուկ համակարգ, որտեղ որպես հենային ազդանշանների աղբյուր օգտագործվել է երկէլքանի հարմոնիկ ազդանշանների ճշգրիտ գեներատոր, որը թույլ է տալիս ստեղծել կառավարվող փուլային շեղում երկու էլքերի միջև մինչև 0,001 աստիճան: Ազդանշանների գրանցման համար օգտագործվել են երկու տարբեր թվային օսցիլոգրաֆներ՝ համապատասխանաբար 8 և 10 կարգայնությամբ:

Գեներատորի էլքերը հատուկ մալուխների միջոցով միացվում են օսցիլոգրաֆի մուտքերին: Մինչև չափումների իրականացումը կատարվել են համակարգի տրամաչափում և հաստատուն սխալների վերացում:

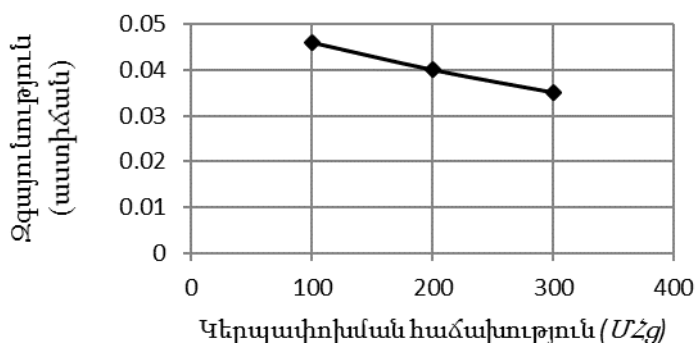
Արդյունքները: Ֆուրյեի դիսկրետ ձևափոխության վրա հիմնված փուլային շեղման չափիչի արդյունավետության գնահատման նպատակով իրականացվել են մի շարք չափումներ: Մասնավորապես, հետազոտվել է զգայնության և արագագործության կախումը գրանցված փաթեթում եղած ընտրությունների քանակից: Նկ. 2-ում բերված են չափման զգայնության և փաթեթի երկարության կախվածության կորերը 8 և 10-կարգանի ԱԹԿ-ների համար:



Նկ. 2. Չափման զգայնության կախվածությունը փաթեթում եղած ընտրությունների քանակից

Ստացված արդյունքներից հետևում է, որ փուլային շեղման չափման զգայնությունը փաթեթի երկարության մեծացման դեպքում մեծանում է: Ընդ որում, միննույն պայմանների դեպքում 10-կարգանի ԱԹԿ-ի կիրառման ժամանակ չափման զգայնությունն աճում է 0,02 աստիճանով:

Հետազոտվել է փուլային շեղման չափման զգայնության կախվածությունը ԱԹԿ-ի կերպափոխման հաճախությունից: Նկ. 3-ում բերված են չափման արդյունքները 8-կարգանի ԱԹԿ-ի համար համապատասխանաբար 100, 200 և 300 ՄՀգ կերպափոխման հաճախության դեպքում:



Նկ. 3. Չափման զգայնության կախվածությունը ԱԹԿ-ի կերպափոխման հաճախությունից

Արդյունքներից երևում է, որ չափման զգայնությունը մեծանում է կերպափոխման հաճախության մեծացմանը զուգընթաց: Մասնավորապես, փոխելով կերպափոխման հաճախությունը 100-ից 300 ՄՀգ, չափման զգայնությունն աճում է 0,01 աստիճանով:

Եզրակացություն: Չափման արդյունքներից կարելի է եզրակացնել, որ փուլային շեղման չափման արդյունավետությունը չափման զգայնության տեսանկյունից Ֆուրյեի արագ ձևափոխության կիրառման արդյունքում բարելավվում է և միննույն պայմանների դեպքում 10-կարգանի ԱԹԿ-ի կիրառման դեպքում 0,02 աստիճանով ավելի բարձր է, քան 8-կարգանի ԱԹԿ-ի դեպքում: Միննույն ժամանակ, չափման արագության վրա ազդում է օգտագործված ԱԹԿ-ի կերպափոխման առավելագույն հաճախությունը: Այսպիսով՝ Ֆուրյեի արագ ձևափոխության կիրառումը թույլ է տալիս օգտագործել ավելի ցածր գնային դասի ԱԹԿ՝ տվյալ խնդրի համար ոչ զգալիորեն նվազեցնելով չափման ճշգրտությունները:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Система двумерной визуализации и мониторинга переменного магнитного поля ISSN 0002-306X / **А.А. Агаджанян, А.А. Ахумян, Т.В. Закарян и др.** // Изв НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 2014. -Т. LXVII, № 4. –С. 395 – 402.
2. **Amatucci W., Walker Broadband D.** Plasma Impedance Measurements and Determination of Plasma Parameters / Novel Research Laboratory. NRL/MR/6750-04-8811.- 2004.
3. **Hopkins M., King L.** Evaluation of a Plasma Impedance Probe in Time-varying Non-uniform Plasma // 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, DOI: 10.2514/6.2013-4129, 2013.
4. **Sedlacek M., Krumpholtz M.** Digital Measurement of Phase Difference// A Comprehensive Study of DSP Algorithms. - 2005.- Vol. 12, no. 4.- P. 427-488.

ՀՀ ԳԱՍ ՌՖԷԻ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 07.02.2015:

А.А. АГАДЖАНЫАН

ЭФФЕКТИВНЫЙ РАДИОЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СДВИГА ФАЗ

Исследована оценка эффективности измерителя фазового сдвига при применении дискретного преобразования Фурье. Показано, что применение быстрого преобразования Фурье позволяет использовать аналого-цифровой преобразователь более низкой ценовой категории, незначительно снижая точность измерений.

Ключевые слова: радиочастотные сигналы, измерение разности фаз, быстрое преобразование Фурье, цифровая обработка сигналов.

A.A. AGHAJANYAN

AN EFFICIENT RF METHOD FOR PHASE SHIFT MEASUREMENT

The meter efficiency of the phase shift at applying the Fourier discrete transformation is estimated. It is shown that the use of the fast Fourier transform allows to use a lower price category of analog-to-digital converter reducing the measurement accuracy only slightly.

Keywords: RF signals, phase shift measurement, fast Fourier transformation, digital signal processing.

С.О. СИМОНЯН, М.А. АДАМЯН

К НЕКОТОРЫМ МЕТОДАМ РЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ
ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНЕЧНЫХ УРАВНЕНИЙ

Предложены конструктивные спектральный, декомпозиционные аналитический и численно-аналитический методы решения линейных однопараметрических систем конечных уравнений, основанные на известном методе наименьших квадратов. При спектральном и численно-аналитическом методах в качестве основного математического аппарата выступают дифференциальные преобразования Пухова, при которых решение исходной непрерывной задачи фактически сводится к решению рекуррентной цепочки некоторых численных задач с матричными вычислениями. Такая трансформация вычислительных процедур позволяет широко применять возможности современных информационных технологий для эффективного решения рассматриваемого класса задач. Рассмотрен модельный пример.

Ключевые слова: линейные однопараметрические системы конечных уравнений, метод наименьших квадратов, декомпозиция, аналитическое решение, дифференциальные преобразования, спектральный и численно-аналитический методы решения.

Введение. Рассмотрим линейные однопараметрические системы конечных уравнений

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

где $A(t) = a_{ij}(t)$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$ и $a(t) = (a_1(t), \dots, a_m(t))^T$ - матрица и вектор правых частей системы с элементами, обладающими достаточной гладкостью по параметру t ; $X(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))^T$ - вектор неизвестных переменных, подлежащий определению.

Решения систем (1) имеют вид

$$X(t) = A^{-1}(t) \cdot a(t), \text{ если } m=n, \text{ rang } A(t) = n \quad (2)$$

и

$$X(t) = A^+(t) \cdot a(t), \text{ если } m \neq n, \quad (3)$$

где $A^{-1}(t)$ - обратная матрица, а $A^+(t)$ - обобщенная обратная к $A(t)$ матрица.

Теперь рассмотрим эквивалентную к системе (1) нормальную систему [1]

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

получаемую из (1) применением к ней метода наименьших квадратов [2]. Решением последней системы, естественно, является соотношение

$$X(t) = [A^T(t) \cdot A(t)]^{-1} \cdot A^T(t) \cdot a(t), \quad (5)$$

очевидно, совпадающее с представлением (3), охватывающим и решение (2) в частном случае. Поэтому в дальнейшем будем оперировать системой (4), как наиболее общим случаем.

Математический аппарат

1. Спектральная модель. По аналогии с методом наименьших квадратов для систем конечных уравнений с числовыми матрицами воспользуемся однопараметрической системой (4) и переведем ее из области оригиналов в область дифференциальных изображений, полагая, что для матриц $A(t)$ и векторов $X(t)$ и $a(t)$ имеют место дифференциальные преобразования [3]

$$A(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{dA^K(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_y}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad A(t) = \aleph_1(t, t_y, H, A(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (6)$$

$$X(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{dX^K(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_y}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad X(t) = \aleph_2(t, t_y, H, X(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (7)$$

$$a(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{da^K(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_y}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad a(t) = \aleph_3(t, t_y, H, a(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (8)$$

где $A(K)$ - матричные дискреты матрицы $A(t)$; $X(K)$ - векторные дискреты вектора $X(t)$; $a(K)$ - векторные дискреты вектора $a(t)$; $K = \overline{0, \infty}$ - целочисленный аргумент; H - масштабный коэффициент; t_y - центр аппроксимации; символ $\overline{\cdot}$ - знак перехода из области оригиналов в область дифференциальных изображений и наоборот; $\aleph_1(\bullet) \div \aleph_3(\bullet)$ - некоторые аппроксимирующие функции, восстанавливающие оригиналы $A(t)$, $X(t)$ и $a(t)$ соответственно.

Теперь в соответствии с правилами алгебры дифференциальных преобразований (см. [3], стр. 72, формула (4.7)) на основе использования нормальной системы (4) будем иметь

$$\sum_{l=0}^K A^T(K-l) \sum_{m=0}^l A(m) X(l-m) = \sum_{l=0}^K A^T(l) \cdot a(K-l), \quad (9)$$

откуда при $K=0$:

$$A^T(0) \cdot A(0) \cdot X(0) = A^T(0) \cdot a(0),$$

следовательно,

$$X(0) = [A^T(0) \cdot A(0)]^{-1} \cdot A^T(0) \cdot a(0) = A^+(0) \cdot a(0), \quad (10)$$

где $A^+(0)$ – псевдообратная к $A(0)$ матрица;

при $K=1$:

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

следовательно,

$$\begin{aligned} X(1) = & [A^T(0) \cdot A(0)]^{-1} \cdot \left[\sum_{l=0}^1 A^T(l) \cdot a(1-l) - \right. \\ & \left. - \sum_{l=0}^1 A^T(1-l) \cdot \sum_{\substack{m=0 \\ l-m=0}}^1 A(m) \cdot X(l-m) \right]; \end{aligned} \quad (11)$$

при $K=2$:

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

следовательно,

$$\begin{aligned} X(2) = & [A^T(0) \cdot A(0)]^{-1} \cdot \left[\sum_{l=0}^2 A^T(l) \cdot a(2-l) - \sum_{l=0}^2 A^T(2-l) \times \right. \\ & \times \sum_{\substack{m=0 \\ l-m=0,1}}^K A(m) \cdot X(l-m) \Big]; \end{aligned} \quad (12)$$

...
при $K=K$:

$$X(K) = [A^T(0) \cdot A(0)]^{-1} \cdot \left[\sum_{l=0}^K A^T(l) \cdot a(K-l) - \sum_{l=0}^K A^T(K-l) \cdot \sum_{\substack{m=0 \\ l-m=0, K-1}}^l A(m) \cdot X(l-m) \right]. \quad (13)$$

Таким образом, имея векторные дискреты (10)-(13), в соответствии с (7) можно восстановить решение $X(t)$.

2. Аналитическое решение (декомпозиционный подход). Представив матрицу $A(t)$ и векторы $X(t)$ и $a(t)$ в виде декомпозиционных соотношений

$$A(t)_{m \times n} = B(t)_{m \times n} + j \cdot C(t)_{m \times n}, \quad (14)$$

$$X(t)_{n \times 1} = G(t)_{n \times 1} + j \cdot H(t)_{n \times 1}, \quad (15)$$

$$a(t)_{m \times 1} = b(t)_{m \times 1} + j \cdot c(t)_{m \times 1}, \quad (16)$$

где $j = \sqrt{-1}$, в соответствии с (4) будем иметь

$$\begin{aligned} & [B^T(t) + j \cdot C^T(t)] \cdot [B(t) + j \cdot C(t)] \cdot [G(t) + j \cdot H(t)] = \\ & = [B^T(t) + j \cdot C^T(t)] \cdot [b(t) + j \cdot c(t)]. \end{aligned}$$

Далее, приравняв действительные и мнимые части в левой и правой частях этого соотношения, получим следующую систему матричных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} B^T(t) \cdot B(t) \cdot G(t) - B^T(t) \cdot C(t) \cdot H(t) - C^T(t) \cdot B(t) \cdot H(t) - C^T(t) \cdot C(t) \cdot G(t) = \\ = B^T(t) \cdot b(t) - C^T(t) \cdot c(t), \\ B^T(t) \cdot B(t) \cdot H(t) + B^T(t) \cdot C(t) \cdot G(t) + C^T(t) \cdot B(t) \cdot G(t) - C^T(t) \cdot C(t) \cdot H(t) = \\ = C^T(t) \cdot b(t) + B^T(t) \cdot c(t). \end{cases}$$

Последнюю можно представить также в виде следующего матрично-блочного-столбцевого эквивалента:

$$\left[\begin{array}{c|c} B^T(t) \cdot B(t) - C^T(t) \cdot C(t) & -B^T(t) \cdot C(t) - C^T(t) \cdot B(t) \\ \hline C^T(t) \cdot B(t) + B^T(t) \cdot C(t) & B^T(t) \cdot B(t) - C^T(t) \cdot C(t) \end{array} \right] \cdot \begin{pmatrix} G(t) \\ H(t) \end{pmatrix} =$$

$$= \left[\begin{array}{c|c} B^T(t) & -C^T(t) \\ \hline C^T(t) & B^T(t) \end{array} \right] \cdot \begin{pmatrix} b(t) \\ c(t) \end{pmatrix} \quad (17)$$

или

$$\left[\begin{array}{c|c} B^T(t) & -C^T(t) \\ \hline C^T(t) & B^T(t) \end{array} \right]_{2n \times 2m} \cdot \left[\begin{array}{c|c} B(t) & -C(t) \\ \hline C(t) & B(t) \end{array} \right]_{2m \times 2n} \cdot \begin{pmatrix} G(t) \\ H(t) \end{pmatrix}_{2n \times 1} =$$

$$= \left[\begin{array}{c|c} B^T(t) & -C^T(t) \\ \hline C^T(t) & B^T(t) \end{array} \right]_{2n \times 2m} \cdot \begin{pmatrix} b(t) \\ c(t) \end{pmatrix}_{2m \times 1}, \quad (18)$$

откуда

$$\begin{pmatrix} G(t) \\ H(t) \end{pmatrix} = \left\{ \left[\begin{array}{c|c} B^T(t) & -C^T(t) \\ \hline C^T(t) & B^T(t) \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c|c} B(t) & -C(t) \\ \hline C(t) & B(t) \end{array} \right] \right\}^{-1} \times$$

$$\times \left[\begin{array}{c|c} B^T(t) & -C^T(t) \\ \hline C^T(t) & B^T(t) \end{array} \right] \cdot \begin{pmatrix} b(t) \\ c(t) \end{pmatrix} = [M(t) \cdot N(t)]^{-1} \cdot M(t) \cdot \begin{pmatrix} b(t) \\ c(t) \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Таким образом, имея в виду (15), получено эквивалентное к (5) матрично-блочное-столбцовое представление решения $X(t)$. Естественно, оно практически может быть использовано при малых размерах матриц $A(t)$, векторов $a(t)$ и их простых элементах.

Замечание 1. Матрицы $M(t)$ и $N(t)$ блочно-кососимметричны относительно первых главных диагоналей и блочно-симметричны относительно вторых главных диагоналей.

3. Численно-аналитическое решение (декомпозиционный подход). Теперь представим численно-аналитическое решение задачи, полагая, что наряду с дифференциальными преобразованиями (6)-(8) для матриц $B(t)$, $C(t)$, векторов $G(t)$, $H(t)$ и $b(t)$, $c(t)$ в соотношениях (14)-(16) с аналитическими элементами имеют место дифференциальные преобразования [3]

$$B(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial B^K(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty}, \quad B(t) = \aleph_4(t, t_v, H, B(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (20)$$

$$C(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial C^K(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad C(t) = \aleph_5(t, t_v, H, C(K), K = \overline{0, \infty}), (21)$$

$$G(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial G^K(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad G(t) = \aleph_6(t, t_v, H, G(K), K = \overline{0, \infty}), (22)$$

$$H(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial H^K(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad H(t) = \aleph_7(t, t_v, H, H(K), K = \overline{0, \infty}), (23)$$

$$b(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial b^K(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad b(t) = \aleph_8(t, t_v, H, b(K), K = \overline{0, \infty}), (24)$$

$$c(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial c^K(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad c(t) = \aleph_9(t, t_v, H, c(K), K = \overline{0, \infty}), (25)$$

где $B(K)$, $C(K)$ – матричные дискретизации матриц $B(t)$, $C(t)$; $G(K)$, $H(K)$ – векторные дискретизации векторов $G(t)$, $H(t)$; $b(K)$, $c(K)$ – векторные дискретизации векторов $b(t)$, $c(t)$; $\aleph_4(\bullet) - \aleph_9(\bullet)$ – некоторые аппроксимирующие функции, восстанавливающие оригиналы – матрицы $B(t)$, $C(t)$ и оригиналы-векторы $G(t)$, $H(t)$ и $b(t)$, $c(t)$ соответственно.

Итак, с учетом (18) в области дифференциальных изображений будем иметь:

при $K=0$:

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{c|c} B^T(0) & -C^T(0) \\ \hline C^T(0) & B^T(0) \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c|c} B(0) & -C(0) \\ \hline C(0) & B(0) \end{array} \right] \cdot \begin{pmatrix} G(0) \\ H(0) \end{pmatrix} = \\ & = \left[\begin{array}{c|c} B^T(0) & -C^T(0) \\ \hline C^T(0) & B^T(0) \end{array} \right] \cdot \begin{pmatrix} b(0) \\ c(0) \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} G(0) \\ H(0) \end{pmatrix} &= \left\{ \begin{bmatrix} B^T(0) & -C^T(0) \\ C^T(0) & B^T(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B(0) & -C(0) \\ C(0) & B(0) \end{bmatrix} \right\}^{-1} \times \\ &\times \begin{bmatrix} B^T(0) & -C^T(0) \\ C^T(0) & B^T(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b(0) \\ c(0) \end{pmatrix}; \end{aligned} \quad (26)$$

при K=1

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} B^T(1) & -C^T(1) \\ C^T(1) & B^T(1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B(0) & -C(0) \\ C(0) & B(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} G(0) \\ H(0) \end{pmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} B^T(0) & -C^T(0) \\ C^T(0) & B^T(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B(1) & -C(1) \\ C(1) & B(1) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} G(0) \\ H(0) \end{pmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} B^T(0) & -C^T(0) \\ C^T(0) & B^T(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B(0) & -C(0) \\ C(0) & B(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} G(1) \\ H(1) \end{pmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} B^T(1) & -C^T(1) \\ C^T(1) & B^T(1) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b(0) \\ c(0) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} B^T(0) & -C^T(0) \\ C^T(0) & B^T(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b(1) \\ c(1) \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} G(1) \\ H(1) \end{pmatrix} &= \left\{ \begin{bmatrix} B^T(0) & -C^T(0) \\ C^T(0) & B^T(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B(0) & -C(0) \\ C(0) & B(0) \end{bmatrix} \right\}^{-1} \times \\ &\times \left\{ \begin{bmatrix} B^T(1) & -C^T(1) \\ C^T(1) & B^T(1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B^T(1) & -C^T(1) \\ C^T(1) & B^T(1) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b(0) \\ c(0) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} B^T(0) & -C^T(0) \\ C^T(0) & B^T(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b(1) \\ c(1) \end{pmatrix} - \right. \\ &- \begin{bmatrix} B^T(1) & -C^T(1) \\ C^T(1) & B^T(1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B(0) & -C(0) \\ C(0) & B(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} G(0) \\ H(0) \end{pmatrix} - \\ &- \left. \begin{bmatrix} B^T(0) & -C^T(0) \\ C^T(0) & B^T(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B(1) & -C(1) \\ C(1) & B(1) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} G(0) \\ H(0) \end{pmatrix} \right\}; \end{aligned} \quad (27)$$

...
при $K=K$:

$$\begin{aligned} & \sum_{l=0}^{K-1} \left[\begin{array}{c|c} B^T(K-l) & -C^T(K-l) \\ \hline C^T(K-l) & B^T(K-l) \end{array} \right] \sum_{m=0}^l \left[\begin{array}{c|c} B(m) & -C(m) \\ \hline C(m) & B(m) \end{array} \right] \left(\begin{array}{c} G(l-m) \\ \hline H(l-m) \end{array} \right) + \\ & + \left[\begin{array}{c|c} B^T(0) & -C^T(0) \\ \hline C^T(0) & B^T(0) \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c|c} B(0) & -C(0) \\ \hline C(0) & B(0) \end{array} \right] \left(\begin{array}{c} G(K) \\ \hline H(K) \end{array} \right) = \\ & = \sum_{l=0}^K \left[\begin{array}{c|c} B^T(K-l) & -C^T(K-l) \\ \hline C^T(K-l) & B^T(K-l) \end{array} \right] \cdot \left(\begin{array}{c} b(l) \\ \hline c(l) \end{array} \right), \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{c} G(K) \\ \hline H(K) \end{array} \right) &= \left\{ \left[\begin{array}{c|c} B^T(0) & -C^T(0) \\ \hline C^T(0) & B^T(0) \end{array} \right] \left[\begin{array}{c|c} B(0) & -C(0) \\ \hline C(0) & B(0) \end{array} \right] \right\}^{-1} \times \\ & \times \left\{ \sum_{l=0}^K \left[\begin{array}{c|c} B^T(K-l) & -C^T(K-l) \\ \hline C^T(K-l) & B^T(K-l) \end{array} \right] \cdot \left(\begin{array}{c} b(l) \\ \hline c(l) \end{array} \right) - \right. \\ & \left. - \sum_{l=0}^{K-1} \left[\begin{array}{c|c} B^T(K-l) & -C^T(K-l) \\ \hline C^T(K-l) & B^T(K-l) \end{array} \right] \cdot \sum_{m=0}^l \left[\begin{array}{c|c} B(m) & -C(m) \\ \hline C(m) & B(m) \end{array} \right] \cdot \left(\begin{array}{c} G(l-m) \\ \hline H(l-m) \end{array} \right) \right\}. \end{aligned} \quad (28)$$

Далее, используя векторные дискретизации (26)-(28), с учетом (22), (23) можно восстанавливать решение (15). Очевидно, предложенный численно-аналитический метод решения исходной задачи практически применим при любых размерах матриц $A(t)$ и векторов $a(t)$, конечно, при их аналитических элементах.

Замечание 2. Матричные дискретизации

$$\begin{aligned} M(0) &= \left[\begin{array}{c|c} B^T(0) & -C^T(0) \\ \hline C^T(0) & B^T(0) \end{array} \right], \dots, M(K) = \left[\begin{array}{c|c} B^T(K) & -C^T(K) \\ \hline C^T(K) & B^T(K) \end{array} \right]; \\ N(0) &= \left[\begin{array}{c|c} B(0) & -C(0) \\ \hline C(0) & B(0) \end{array} \right], \dots, N(K) = \left[\begin{array}{c|c} B(K) & -C(K) \\ \hline C(K) & B(K) \end{array} \right] \end{aligned}$$

блочнo-кососимметричны относительно первых главных диагоналей и блочно-симметричны относительно вторых главных диагоналей. Эти свойства, очевидно,

сохраняются и для произведений $M(0) \cdot N(0), \dots, M(K) \cdot N(K)$, а также для $[M(0) \cdot N(0)]^{-1}$.

Модельный пример. Рассмотрим линейную однопараметрическую корректную систему конечных уравнений

$$\begin{bmatrix} (1+t+j \cdot t^2) & 0 & (2+t^2+j \cdot t) \\ (-1+jt) & (2+j) & 0 \\ 0 & jt^3 & (1+jt^2) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (3+t+t^2-t^3)+j \cdot 2t \cdot (1+t) \\ (1+t-t^2)+j \cdot (1-2t) \\ (1+t^4)+j \cdot t^2 \cdot (1+t) \end{pmatrix},$$

обладающую решением $x_1(t)=1+jt$, $x_2(t)=1-jt$, $x_3(t)=1$, полученным в [5] известным параллельным методом [4] и декомпозиционным методом [5]. Представим решение этой задачи предложенным в настоящей работе спектральным методом, принимая $t_v = 0$, $H=1$. Очевидно, имеем

$$A(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 \\ -1 & (2+j) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A(1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & j \\ j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A(2) = \begin{bmatrix} j & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & j \end{bmatrix},$$

$$A(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 \end{bmatrix}, \quad A(K) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad K \geq 4;$$

$$a(0) = \begin{pmatrix} 3 \\ (1+j) \\ 1 \end{pmatrix}, \quad a(1) = \begin{pmatrix} (1+2j) \\ (1-2j) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad a(2) = \begin{pmatrix} (1+2j) \\ -1 \\ j \end{pmatrix},$$

$$a(3) = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ j \end{pmatrix}, \quad a(4) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad a(K) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad K \geq 5;$$

$$A^T(0) \cdot A(0) = \begin{bmatrix} 2 & -(2+j) & 2 \\ -(2+j) & (2+j)^2 & 0 \\ 2 & 0 & 5 \end{bmatrix},$$

$$[A^T(0) \cdot A(0)]^{-1} = \begin{bmatrix} 5 & \frac{5}{2+j} & -2 \\ \frac{5}{2+j} & \frac{6}{(2+j)^2} & -\frac{2}{2+j} \\ -2 & -\frac{2}{2+j} & 1 \end{bmatrix};$$

$$A^+(0) = A^{-1}(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -2 \\ \frac{1}{2+j} & \frac{1}{2+j} & -\frac{2}{2+j} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Тогда в соответствии с (10) получим

$$X(0) = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Далее в соответствии с (11) имеем

$$A^T(1) \cdot A(0) \cdot X(0) = \begin{pmatrix} (2+j) \\ 0 \\ 3j \end{pmatrix}, \quad A^T(0) \cdot A(1) \cdot X(0) = \begin{pmatrix} 1 \\ (-1+2j) \\ 2(1+j) \end{pmatrix},$$

$$A^T(1) \cdot a(0) = \begin{pmatrix} (2+j) \\ 0 \\ 3j \end{pmatrix}, \quad A^T(0) \cdot a(1) = \begin{pmatrix} 4j \\ (4-3j) \\ 2(1+2j) \end{pmatrix}.$$

Следовательно,

$$X(1) = \begin{bmatrix} 5 & \frac{5}{2+j} & -2 \\ \frac{5}{2+j} & \frac{6}{(2+j)^2} & -\frac{2}{2+j} \\ -2 & -\frac{2}{2+j} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} (-1+4j) \\ 5 \cdot (1-j) \\ 2j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} j \\ -j \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Аналогично в соответствии с (12) получим

$$\begin{aligned}
 A^T(2) \cdot A(0) \cdot X(0) &= \begin{pmatrix} 3j \\ 0 \\ (3+j) \end{pmatrix}, \quad A^T(1) \cdot A(1) \cdot X(0) = \begin{pmatrix} j \\ 0 \\ (-1+j) \end{pmatrix}, \\
 A^T(1) \cdot A(0) \cdot X(1) &= \begin{pmatrix} (3+2j) \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad A^T(0) \cdot A(2) \cdot X(0) = \begin{pmatrix} (1+j) \\ 0 \\ (2+3j) \end{pmatrix}, \\
 A^T(0) \cdot A(1) \cdot X(1) &= \begin{pmatrix} (1+j) \\ (-2-j) \\ 2j \end{pmatrix}; \\
 A^T(2) \cdot a(0) &= \begin{pmatrix} 3j \\ 0 \\ (3+j) \end{pmatrix}, \quad A^T(1) \cdot a(1) = \begin{pmatrix} 3 \cdot (1+j) \\ 0 \\ (-2+j) \end{pmatrix}, \\
 A^T(0) \cdot a(2) &= \begin{pmatrix} 2 \cdot (1+j) \\ -(2+j) \\ (2+5j) \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

Следовательно,

$$X(2) = \begin{bmatrix} 5 & \frac{5}{2+j} & -2 \\ \frac{5}{2+j} & \frac{6}{(2+j)^2} & -\frac{2}{2+j} \\ -2 & -\frac{2}{2+j} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Нетрудно убедиться, что и при $K \geq 3$ получаются нулевые векторные дискретности, т.е. $X(K) = (0, 0, 0)^T$, $\forall K \geq 3$. Поэтому имеем окончательное решение $x_1(t) = 1 + jt$, $x_2(t) = 1 - jt$, $x_3(t) = 1$, точно совпадающее с решением, полученным в [5] отмеченными выше двумя методами.

Заключение. Таким образом, предложены три различных метода решения линейных однопараметрических систем конечных уравнений, базирующихся на одном и том же подходе – на методе наименьших квадратов – спектральная модель, аналитический и численно-аналитический методы. Если аналитический метод

практически применим для задач с малыми размерами, то первый и третий, основанные на дифференциальных преобразованиях, применимы для задач с любыми размерами, однако при их аналитических элементах. Рассмотренный модельный пример и его решение спектральным методом подтверждают работоспособность предложенных методов и возможность эффективного использования средств современных информационных технологий [6] для решения линейных однопараметрических систем конечных уравнений как с действительными, так и с комплексными матрицами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ланкастер П.** Теория матриц. – М.: Наука, 1978. – 280 с.
2. **Лоусон Ч., Хенсон П.** Численное решение задач метода наименьших квадратов. – М.: Наука, 1986. – 232 с.
3. **Пухов Г.Е.** Дифференциальные преобразования функций и уравнений. – Киев: Наукова думка, 1984. – 420 с.
4. **Simonyan S.H., Avetissyan A.G.** The method of Linear Non-Autonomous Finite Equation Sets Solution on the Basis Differential-Taylor Transforms // Engineering Simulation. – 1998. – Vol. 15, № 4. – P. 407-421.
5. **Симонян С.О., Адамян М.А.** Декомпозиционные методы решения линейных однопараметрических корректных систем конечных уравнений с комплексными матрицами // Известия НАН РА и НПУА. Серия Техн. науки. – 2015. – Т. LXVIII, № 1. – С. 61-72.
6. **Макс Шлее** Qt 9.8. Профессиональное программирование на C++. СПб.: “БХВ-Петербург”, 2012. – 912 с.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 24.10.2014.

UDC 62-50

AUTOMATION AND CONTROL
SYSTEMST.N. HOVANISSYAN, N.H. VARDANYAN, E.R. KHARISOV,
O.N. GASPARYAN, N.V. HOVAKIMYANON APPLICATION OF L_1 ADAPTIVE CONTROL TO MULTIVARIABLE
CONTROL SYSTEMS

Part 2. Uniform Systems

Some issues concerning the stability of uniform adaptive control systems for rejection of external disturbances are discussed. Based on the properties of positive real transfer matrices, it is shown that such systems are stable for arbitrary large values of the adaptation gain, even in the case of the systems with right half plane zeros. Some specific features of uniform adaptive systems are revealed and explained.

Keywords: multivariable control system, uniform system, adaptive control, stability, characteristic transfer function, positive real system.

The paper examines the application of L_1 adaptive control to multivariable control systems [1,2]. L_1 adaptive control was developed to address some of the deficiencies apparent in *Model Reference Adaptive Control* (MRAC), as a loss of robustness in the presence of fast adaptation [3,4]. The first part of the paper was devoted to the application of L_1 adaptive control to general-type *square*, i.e. having the same number of inputs and outputs, *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) control systems [5,6] subjected to external disturbances. In Part 2, a special class of *uniform* MIMO systems is discussed.

Uniform Systems. In various technical applications, such as aerospace engineering, chemical industry and many others, the so-called *uniform* MIMO systems occur very often [6]. The separate channels of uniform MIMO systems have identical transfer functions $w(s)$, and the cross-connections are *rigid*, i.e. are characterized by a real-valued numerical matrix $R = \{r_{ij}\}$. To get a better insight in the structural features of uniform systems and their difference from the general-type MIMO control systems, two matrices, as well as extended (for $N=2$) block diagrams of both classes of multivariable control systems are shown in Fig. 1.

The transfer matrix $W(s) = \{r_{ij}w(s)\}$ of the uniform system can be written as:

$$W(s) = w(s)R. \quad (1)$$

In what follows, we will assume that the transfer function $w(s)$ is completely controllable and observable, strictly stable, and, maybe, with *Right Half Plane* (RHP) zeros.

As a basic model of linear N -dimensional uniform systems with constant parameters, let us consider the system that can be expressed in the following standard state-space form:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) &= Cx(t),\end{aligned}\tag{2}$$

where $x(t)$ is an n_x -dimensional state vector; $u(t)$ and $y(t)$ are N -dimensional vectors of inputs and outputs; A, B, C are constant matrices of appropriate sizes.

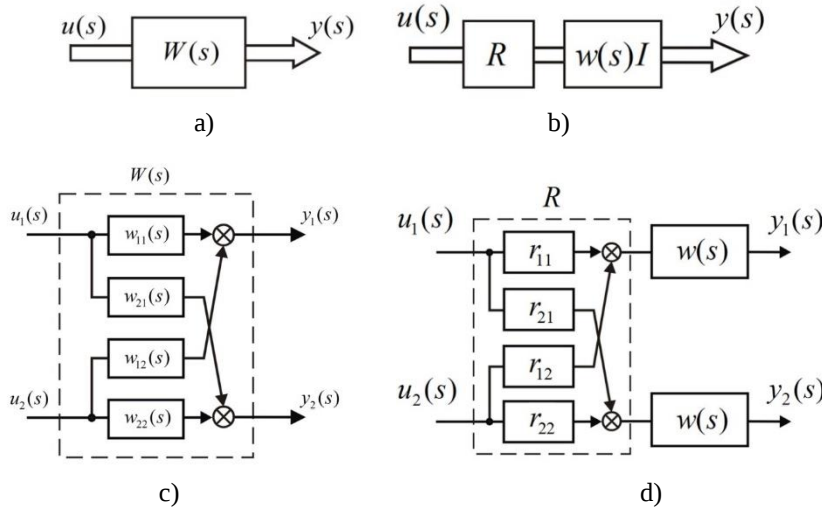


Fig. 1. Block diagrams of the MIMO system: (a), (c) Matrix and extended block diagrams of general-type systems; (b), (d) Matrix and extended block diagrams of uniform systems

Generally, the transfer matrix $W(s)$ (1) of uniform systems, which constitute a particular class of general-type MIMO systems, is connected with the matrices A, B, C in (2) by the common formula [5]:

$$W(s) = C(sI - A)^{-1}B,\tag{3}$$

where I is an identity matrix.

Disturbance Rejection by Means of Adaptive Control. In this section, we will follow the results presented in [1]. Let an N -dimensional *strictly stable* uniform system be described in state-space by the following equations:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + B(u(t) + \sigma(t)), \quad x(0) = x_0, \\ y(t) &= Cx(t),\end{aligned}\tag{4}$$

where $\sigma(t)$ is an N -dimensional time-dependent vector of unknown external bounded ($|\sigma(t)| \leq \Delta_0$) disturbances that should be rejected by adaptive control, and all other matrices and vectors have the dimensions as in (2).

The state predictor has the same structure as the systems in (4):

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + B(u(t) + \hat{\sigma}(t)), \quad \hat{x}(0) = x_0, \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t),\end{aligned}\tag{5}$$

and the only difference is that the unknown disturbance vector $\sigma(t)$ is replaced by its estimate $\hat{\sigma}(t)$.

The disturbance rejection process is governed by the following adaptation law [1]

$$\dot{\hat{\sigma}}(t) = \Gamma B^T P \varepsilon(t),\tag{6}$$

where

$$\varepsilon(t) = x(t) - \hat{x}(t)\tag{7}$$

is the *prediction error*, P ($P = P^T > 0$) is the solution of the Lyapunov equation

$$A^T P + PA = -Q\tag{8}$$

for an arbitrary symmetric positive definite matrix Q ($Q = Q^T > 0$), and the positive scalar $\Gamma > 0$ is called the *adaptation gain* [1,2].

The control signal $u(t)$ of the system is given in operator form as:

$$u(s) = Q(s)(k_g r(s) - \hat{\sigma}(s)),\tag{9}$$

where $r(s)$ is an N -dimensional reference signal, k_g is an $N \times N$ static matrix, and $Q(s)$ is the transfer matrix of a low-pass filter having the form

$$Q(s) = q(s)I,\tag{10}$$

where $q(s)$ is a strictly proper transfer function [usually, satisfying the condition $q(0) = 1$]. Its state-space realization assumes zero initialization.

The general block diagram of the adaptive control system (4) with the disturbance rejection law (6) is depicted in Fig. 2 and represents a linear MIMO system with an integral feedback [1].

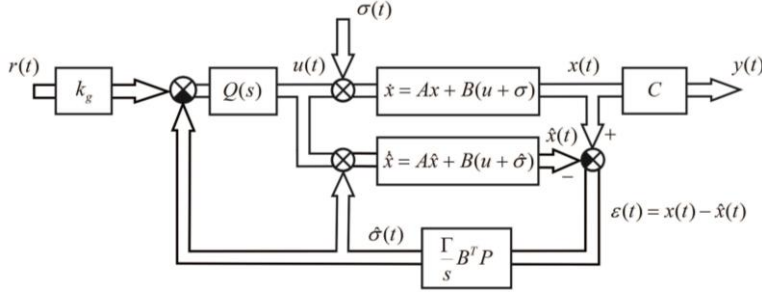


Fig. 2. Block diagram of the adaptive system with the state predictor and the adaptive disturbance rejection law (6)

In [1], it is shown that the block diagram in Fig. 2 is described by the following matrix equation:

$$y(s) = w(s)q(s)Rk_g r(s) + w(s)R \left[I - q(s)[I + W_0(s)]^{-1} W_0(s) \right] \sigma(s), \quad (11)$$

where

$$W_0(s) = \frac{\Gamma}{s} W_B(s); \quad W_B(s) = B^T P(sI - A)^{-1} B, \quad (12)$$

and the formulas of the transfer matrices $W(s)$ (1) and $Q(s)$ (10) are used.

The matrix equation (11) implies that dynamics of the uniform adaptive system can be represented by two independent block diagrams in Fig. 3 and 4, where the first one describes the system behavior with respect to the reference signal $r(t)$, and the second, with respect to the disturbance vector $\sigma(t)$.

Stability analysis of the uniform adaptive system. In essence, stability properties of the uniform systems in Fig. 2, 3, and 4 are the same as for the general-type MIMO systems discussed in [1]. Particularly, the block diagram in Fig. 3 represents an open-loop and stable uniform system, since both transfer functions $q(s)$ and $w(s)$ are assumed stable. Besides, that system does not depend on the adaptation gain Γ .

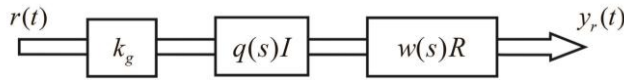


Fig. 3. Equivalent block diagram of the uniform adaptive system with respect to the input reference signal $r(t)$

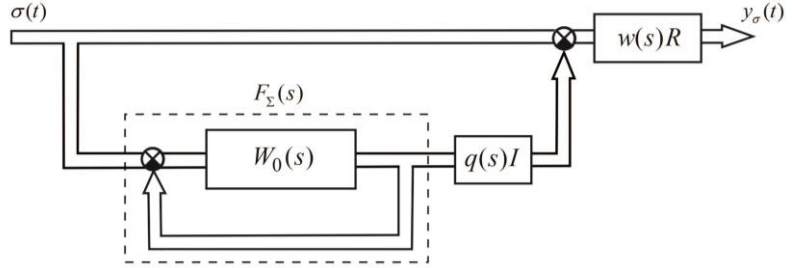


Fig. 4. An equivalent block diagram of the uniform adaptive system with respect to the disturbance $\sigma(t)$

As for the block diagram in Fig. 4, it contains a negative feedback loop with the open-loop transfer matrix $W_0(s)$ (12) and the following closed-loop transfer matrix:

$$F_{\Sigma}(s) = [I + W_0(s)]^{-1} W_0(s), \quad (13)$$

the roots of the characteristic equation

$$\det[I + W_0(s)] = 0 \quad (14)$$

of which depend on Γ . Note also that the system with the $N \times N$ transfer matrix $W_B(s)$ in (12) is, due to its form, a *Positive Real* (PR) transfer matrix [1,3,4,7].

Any uniform system with the transfer matrix $W(s) = \{r_{ij}w(s)\} = w(s)R$ can be treated as a general-type MIMO system, which results in the state-space vector $x(t)$ of order $n_x = n_x^0 \cdot N^2$ [1], where n_x^0 is the order of the transfer function $w(s)$ in (1).

Another choice is based on the following equations of the uniform system:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_0 x_i(t) + b_0 \varphi_i(t), \\ \varphi_i(t) &= \sum_{j=1}^N r_{ij} u_j(t), \quad y_i(t) = c_0^T x_i(t), \quad (i=1, 2, \dots, N), \end{aligned} \quad (15)$$

where the triple (A_0, b_0, c_0) corresponds to the state-space representation of the transfer function $w(s)$ in (1). The vector $x(t)$ in this case has the form

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1^T(t) & x_2^T(t) & x_3^T(t) & \dots & x_{N-1}^T(t) & x_N^T(t) \end{bmatrix}^T, \quad (16)$$

and its order $n_x = n_x^0 \cdot N$ is N times as small as that in the general case. It can be shown that in this case, the transfer matrix $W_0(s)$ (12) is not diagonal (as in the case of general-type systems [1]), but preserves the structure inherent in uniform systems:

$$W_0(s) = \frac{\Gamma}{s} w_0(s) R_0, \quad (17)$$

where the transfer function $w_0(s)$ is given by the following expression

$$w_0(s) = b_0^T P_0 (sI - A_0)^{-1} b_0, \quad (18)$$

and the numerical matrix of cross-connections R_0 is a positive definite symmetric matrix equal to

$$R_0 = R^T R. \quad (19)$$

In equation (18), the positive definite symmetric matrix P_0 solves the Lyapunov equation:

$$A_0^T P_0 + P_0 A_0 = -Q_0. \quad (20)$$

Note that the inspection of equations (15) and (18) shows that the transfer function $w_0(s)$ belongs to PR functions, the properties of which are thoroughly discussed in technical literature [1-4,7].

Based on the *Characteristic Transfer Function* (CTF) method [6], the transfer matrix $W_0(s)$ (12) can be represented in the canonical form:

$$W_0(s) = L \text{diag}\{q_i^0(s)\} L^{-1}; \quad q_i^0(s) = \lambda_i \frac{\Gamma}{s} w_0(s), \quad (i=1,2,\dots, N), \quad (21)$$

where $q_i^0(s)$ are called the CTFs of $W_0(s)$ (we will assume them *distinct*), the *unitary* (i.e. $L^{-1} = L^*$) modal matrix L is composed of the orthonormal set of eigenvectors l_i of the symmetric matrix R_0 (19), and λ_i are *real-valued* and *positive* eigenvalues of R_0 .

Allowing for (21), the characteristic equation (14) takes the form

$$\det[I + W_0(s)] = \prod_{i=1}^N \left[1 + \lambda_i \frac{\Gamma}{s} w_0(s) \right] = 0, \quad (22)$$

and the stability of the uniform adaptive system in Figure 2 is defined by N characteristic equations:

$$1 + \lambda_i \frac{\Gamma}{s} w_0(s) = 0, \quad (i=1,2,\dots, N). \quad (23)$$

Following the arguments presented in [1], we can claim that the CTFs $q_i^0(s)$ in (21) have a relative degree 1 or 2 and are minimum-phase, even if the transfer function $w(s)$ in (1) has RHP zeros. Besides, the phases of $q_i^0(j\omega)$ are always less or equal to $\pm 180^\circ$, which means that the Nyquist plots of $q_i^0(j\omega)$ cannot encircle the critical point $(-1, j0)$, irrespectively of the value of the gain Γ . Finally, the root loci of the CTFs $q_i^0(s)$ will tend to infinity, as $\Gamma \rightarrow \infty$, along the negative real semi-axis or along the asymptotes that are parallel to the imaginary axis and lie in the left half plane.

Note that if the matrix of cross-connections of the uniform system is orthogonal, i.e. $R^T = R^{-1}$, the matrix R_0 (19) becomes an identity matrix (i.e. $R_0 = I$), and the stability of the adaptive system will not depend at all on the matrix R and the number of channels N . Indeed, if $R^T = R^{-1}$, then, instead of (21), we have the expression

$$W_0(s) = \frac{\Gamma}{s} w_0(s) I, \quad (24)$$

and the stability of the uniform adaptive system will be determined by the stability of a single closed-loop one-dimensional system with the characteristic equation

$$1 + \frac{\Gamma}{s} w_0(s) = 0. \quad (25)$$

Example. Consider a three-dimensional uniform system with the following transfer function of separate channels:

$$w(s) = \frac{20}{(s+0.5)(s+2)(s+10)}, \quad (26)$$

the numerical matrix of cross-connections

$$R = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.03 & -0.01 \\ -0.05 & 0.866 & 0.5 \\ 0.02 & -0.5 & 0.866 \end{bmatrix}, \quad (27)$$

and the transfer matrix of low-pass filter $Q(s) = [1/(0.01s+1)]I$.

Based on the structure of the uniform system, we can write:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_0 x_i(t) + b_0 \varphi_i(t), \\ \varphi_i(t) &= \sum_{j=1}^N r_{ij} u_j(t), \quad y_i(t) = c_0^T x_i(t) \quad (i=1, 2, 3), \end{aligned} \quad (28)$$

where

$$A_0 = \begin{bmatrix} -0.5 & 1.0 & 0 \\ 0 & -2.0 & 1.0 \\ 0 & 0 & -10.0 \end{bmatrix}; b_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 4 \end{bmatrix}; c_0 = \begin{bmatrix} 5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

The solution P_0 to the Lyapunov equation (20) for $Q_0 = I$ is

$$P_0 = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.4 & 0.0381 \\ 0.4 & 0.45 & 0.0407 \\ 0.0381 & 0.0407 & 0.0541 \end{bmatrix}, \quad (30)$$

and the symmetric positive definite matrix of cross-connections R_0 (19) in the transfer matrix $W_0(s)$ (17) is

$$R_0 = \begin{bmatrix} 0.8110 & -0.0240 & -0.0057 \\ -0.0240 & 1.0025 & -0.0010 \\ -0.0057 & -0.0010 & 1.0004 \end{bmatrix}. \quad (31)$$

The eigenvalues λ_i of the matrix R_0 are

$$\lambda_1 = 0.8079, \quad \lambda_2 = 1.0006, \quad \lambda_3 = 1.0055 \quad (32)$$

and the transfer function $w_0(s)$ calculated by the formula (18) is equal to

$$w_0(s) = \frac{0.86508(s+2.377)(s+0.8754)}{(s+0.5)(s+2)(s+10)}. \quad (33)$$

The Nyquist plot of the transfer function $w_0(s)$ (33) for positive frequencies $\omega \geq 0$ is shown in Fig. 5 and verifies that $w_0(s)$ is positive real.

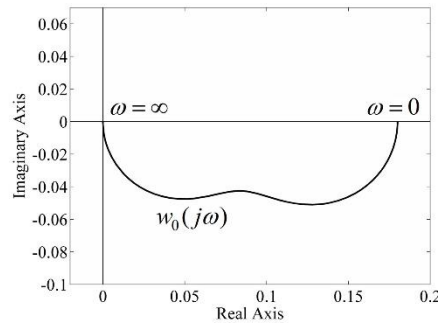


Fig. 5. Nyquist plot of the transfer function $w_0(s)$ (33) for $\omega \geq 0$

The CTFs $q_i^0(s)$ of the transfer matrix $W_0(s)$ (21) correspond to three common single-input single-output systems with real-valued parameters, where the eigenvalues λ_i (32) can be regarded as usual gains:

$$q_i^0(s) = \lambda_i \Gamma \frac{0.86508(s+2.377)(s+0.8754)}{s(s+0.5)(s+2)(s+10)}, \quad (34)$$

$i = 1, 2, 3.$

Note that all λ_i (32) in $q_i^0(s)$ (34) are real-valued and quite close to 1. Therefore, the root loci of the CTFs $q_i^0(s)$ (34) completely coincide (only the roots of the closed-loop CTFs slightly differ) and the difference of the Nyquist plots of $q_i^0(s)$ is actually imperceptible. The Nyquist plot and root loci of the CTF $q_3^0(s)$ (the CTF with the largest eigenvalue $\lambda_3 = 1.0055$) for $\Gamma = 20$ are shown in Fig. 6.

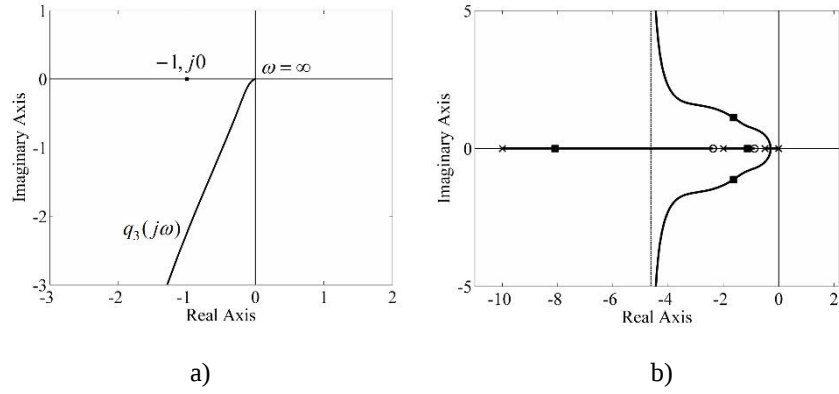
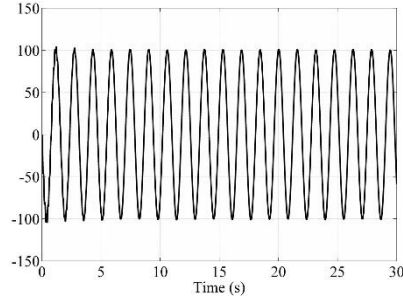
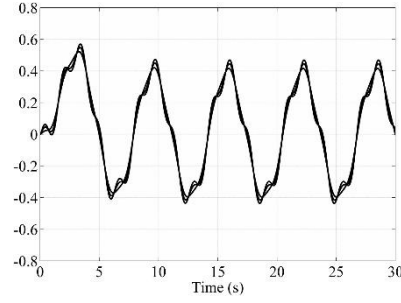


Fig. 6. Nyquist (a) and root loci (b) plots of the CTF $q_3^0(s)$ for $\Gamma = 20$

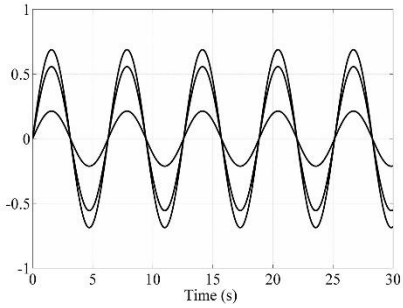
The results of simulation of the three-dimensional uniform adaptive system with the help of *Simulink* for $\Gamma = 5000$, two types of reference input signals (sinusoidal signals with unit amplitudes, zero phase shifts, and period $T = 6.28$ s, as well as unit step signals applied simultaneously at $t = 1.0$ s), and sinusoidal disturbances with amplitudes $A_d = 100$ and period $T_d = 1.57$ s are shown in Figures 7 and 8. Note that the amplitudes of disturbances are 100 times as large as the amplitudes (or unit step values) of reference signals $r(t)$.



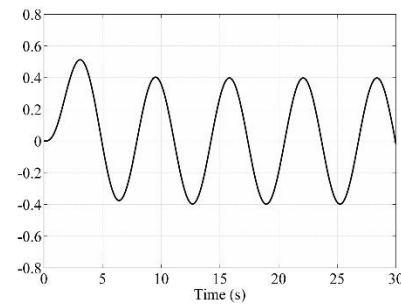
a) Control signal $u(t)$



b) Output signal $y(t)$

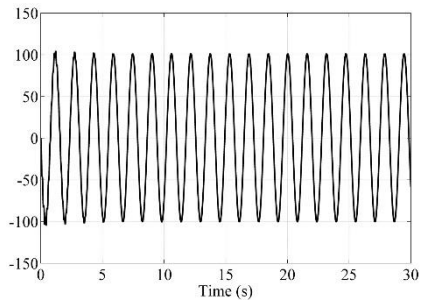


c) Control signal $u(t)$

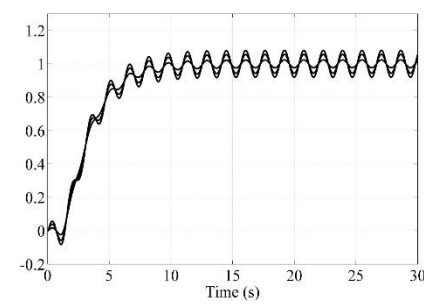


d) Output signal $y(t)$

Fig. 7. Simulation results. Sinusoidal reference inputs $r_i(t) = \sin(t)$: (a), (b) sinusoidal disturbances $\sigma_i(t) = 100\sin(4t)$; (c), (d) zero disturbances $\sigma_i(t) = 0$



a)



b)

Fig. 8. Simulation results. Unit step reference inputs, sinusoidal disturbances $\sigma_i(t) = 100\sin(4t)$ ($i = 1, 2, 3$) : (a) Control signal $u(t)$; (b) Output signal $y(t)$

In Fig. 7(c), (d), to get a better understanding of behavior of the adaptive system, the results of simulation with the same sinusoidal reference signals but without

disturbances (i.e. $\sigma(t) = 0$) are shown. In fact, as the principle of superposition is valid for the discussed adaptive system, the output signals of the system with sinusoidal disturbances are the sum of the output signals of the system with $\sigma(t) = 0$ and the same system with disturbances but zero reference signals $r(t) = 0$. The same is true for unit step reference signals (Fig. 8). The results of simulation for $r(t) = 0$ and sinusoidal disturbances $\sigma_i(t) = 100\sin(4t)$ are presented in Fig. 9. The control signal $u(t)$ in this case is actually the same as in Fig. 7(a) and 8(a) due to the large ratio of amplitudes of disturbances and reference signals.

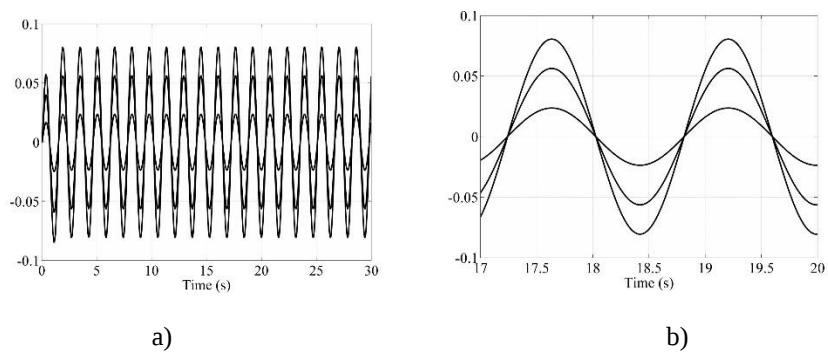


Fig. 9. Simulation results. Zero reference inputs $r(t) = 0$, sinusoidal disturbances $\sigma_i(t) = 100\sin(4t)$; (a) Output signal $y(t)$; (b) Output signal $y(t)$ (enlarged)

Finally, it should be noted that an increase in Γ will bring to smaller deviations of $y(t)$ from the ideal outputs, i.e. to higher performance of the L_1 adaptive system.

REFERENCES

1. On Application of L_1 Adaptive Control to Multivariable Control Systems. Part I. General-Type Multivariable Systems / **T. Hovanissyan, N. Vardanyan, E. Kharisov, O. Gasparyan, et al** // Известия НАН РА и НПУА. Сер. ТН. – 2014. – Т.67, №4. – С. 434-445.
2. **Hovakimyan N. and Cao C.** L_1 Adaptive Control Theory-Guaranteed Robustness with Fast Adaptation.- SIAM, Philadelphia, 2010. -340p.
3. **Astrom K. and Wittenmark B.** Adaptive Control.- Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, 1994. -575p.
4. **Ioannou P. and Sun J.** Robust Adaptive Control.- Prentice Hall, 1996. -834p.
5. **Skogestad S. and Postlethwaite I.** Multivariable Feedback Control. Analysis and Design. - John Wiley and Sons Ltd., Chichester, Sussex, UK, 2005. -595p.
6. **Gasparyan O.N.** Linear and Nonlinear Multivariable Feedback Control: A Classical Approach. - John Wiley & Sons, UK, 2008. -354p.
7. **Slotine J.-J. E. and Li W.** Applied Nonlinear Control.- Prentice Hall, Englewood Cliffs, USA, 1991. -476p.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received 21.08.2014.

Տ.Ն. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Ն.Հ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Ե. Ռ. ԽԱՐԻՍՈՎ, Օ.Ն. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ,
Ն.Գ. ՀՈՎԱԿԻՄՅԱՆ

**ԲԱԶՄԱԶԱՓ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԿԱՐԳԵՐՈՒՄ L1 ՀԱՐՄԱՐՎՈՂ
ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ԿԻՐԱՌՄԱՆ ՎԵՐԱԲԵՐՑԱԼ**

Մաս 2. Միատիպ համակարգեր

Դիտարկված են հարցեր, որոնք առնչվում են արտաքին վրդովմունքները չեզոքացնելուն ուղղված միատիպ հարմարվող կառավարման համակարգերի կայունությանը: Հիմնվելով դրական իրական փոխանցման մատրիցների հատկությունների վրա՝ ցույց է տրված, որ այդպիսի համակարգերը կայուն են հարմարման գործակցի կամայական մեծ արժեքների, նույնիսկ աջակողմյան զրոներով համակարգերի դեպքում: Բացահայտված և վերլուծված են միատիպ հարմարվող համակարգերի որոշ առանձնահատկություններ:

Առանցքային բառեր. կառավարման բազմաչափ համակարգ, միատիպ համակարգ, հարմարվող կառավարում, կայունություն, բնութագրիչ փոխանցման ֆունկցիա, դրական իրական համակարգ:

**Т.Н. ОГАННИСЯН, Н.А. ВАРДАНЯН, Е.Р. ХАРИСОВ, О.Н. ГАСПАРЯН,
Н.Г. ОВАКИМЯН**

**О ПРИМЕНЕНИИ L1 АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В МНОГОМЕРНЫХ
СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ**

Часть 2. Однотипные системы

Рассмотрены некоторые вопросы, связанные с устойчивостью однотипных адаптивных систем управления, предназначенных для компенсации внешних возмущений. Основываясь на свойствах положительных действительных передаточных матриц, показано, что подобные системы устойчивы при произвольно больших значениях коэффициента адаптации, даже в случае систем с правосторонними нулями. Выявлены и объяснены некоторые специфические свойства однотипных адаптивных систем.

Ключевые слова: многомерная система управления, однотипная система, адаптивное управление, устойчивость, характеристическая передаточная функция, положительная действительная система.

Ю.Р. АКОПЯН, М.Г. ХАЧАТРЯН
ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КУБИЧЕСКИХ СПЛАЙНОВ В ЗАДАЧЕ
СГЛАЖИВАНИЯ ДАННЫХ

Рассматривается задача сглаживания экспериментальных данных методом наименьших квадратов с использованием кубических сплайнов с краевыми условиями смешанного типа. Предлагается численный алгоритм построения таких сплайнов. Дается описание созданного в среде Matlab пользовательского интерфейса.

Ключевые слова: сглаживание данных, метод наименьших квадратов, нормальная система, кубический сплайн, пакет MatLab, графический интерфейс.

Введение. Современный уровень развития компьютерной техники позволяет решать практические задачи, связанные с обработкой больших массивов данных. Такие задачи возникают во многих областях, использующих математические методы. В частности, хорошо известна задача сглаживания результатов статистических наблюдений, экспериментов или измерений. Несмотря на свою давность, метод наименьших квадратов остается одним из наиболее эффективных и широко используемых на практике методов математической обработки опытных данных. Многие пакеты прикладных программ, например, такие как MatLab, Mathematica и Mathcad, включают в себя инструменты для решения задачи наименьших квадратов. Однако следует отметить, что набор аппроксимирующих функций и предоставляемые пользователю возможности еще далеки от совершенства. В частности, это касается выбора близкой к характеру поведения данных аппроксимирующей функции, графического представления результатов сглаживания, возможности оперативного изменения параметров и т.д.

Как известно, сплайны являются важной составной частью математической теории аппроксимации и имеют многочисленные применения в различных вычислительных приложениях [1,2]. Наиболее широко используются на практике, в силу простоты их построения и достаточно высокой гладкости, полиномиальные кубические сплайны. Вместе с тем они недостаточно полно представлены в программных средствах, ориентированных на решение задачи сглаживания данных методом наименьших квадратов.

В существующей литературе рассматриваются кубические сплайны с различными ограничениями на концах отрезка аппроксимации. Обычно это условия, накладываемые на первые и вторые производные сплайн-функции. В настоящей работе рассматриваются кубические сплайны с более общими, смешанными краевыми условиями.

выми условиями, содержащими комбинацию первых и вторых производных. Приводится алгоритм построения таких сплайнов. Дается описание работающего в диалоговом режиме пользовательского интерфейса в среде MatLab, позволяющего сглаживать данные методом наименьших квадратов на основе кубических сплайнов с краевыми условиями смешанного типа.

Кубические сплайны с краевыми условиями смешанного типа. Рассмотрим некоторое разбиение

$$a = t_0 < t_1 < \dots < t_n = b \quad (1)$$

отрезка $[a, b]$, где $n \geq 1$. Пусть в точках разбиения t_k , $k = 0, 1, \dots, n$ заданы значения v_k , $k = 0, 1, \dots, n$. Функция $S(x)$ называется *интерполяционным кубическим сплайном*, ассоциированным с разбиением (1), если:

а) на каждом отрезке $[t_k, t_{k+1}]$, $k = 0, 1, \dots, n-1$ функция $S(x)$ является многочленом третьей степени;

б) $S(x) \in C^2[a, b]$;

в) $S(t_k) = v_k$, $k = 0, 1, \dots, n$

(см., напр., [1]). Задаваемые условия обеспечивают непрерывность самой функции $S(x)$, а также ее первой и второй производных в точках разбиения (1), которые в дальнейшем будем называть *опорными узлами* сплайна.

Как известно, для корректности задачи построения сплайна нужны дополнительные условия [2]. Обычно эти условия ставятся на концах отрезка $[a, b]$ и содержат требования на первые и вторые производные функции $S(x)$. Если $S'(a) = d_a$, $S'(b) = d_b$, где d_a, d_b – заданные величины, то такой сплайн называется *смыкающим*. Условия $S''(a) = d_a$, $S''(b) = d_b$ определяют кубический сплайн, имеющий заданную кривизну на концах отрезка. В частности, если $S''(a) = 0$, $S''(b) = 0$, то такой сплайн называется *естественным* (см., напр., [3]). В настоящей работе мы зададим более общий, *смешанный тип* краевых условий, а именно:

$$\alpha_1 S''(a) + \alpha_2 S'(a) = d_a, \quad \beta_1 S''(b) + \beta_2 S'(b) = d_b; \quad (2)$$

при этом мы полагаем, что коэффициенты α_1, α_2 и β_1, β_2 таковы, что

$$\alpha_1 \geq 0, \quad \alpha_2 \leq 0, \quad \alpha_1^2 + \alpha_2^2 \neq 0, \quad \beta_1 \geq 0, \quad \beta_2 \geq 0, \quad \beta_1^2 + \beta_2^2 \neq 0. \quad (3)$$

В работе [4] получено аналитическое выражение для кубического сплайна с краевыми условиями (2). Для значений $k = 0, 1, \dots, n-1$ сплайн вычисляется по формуле

$$S(x) = v_k + \left(\frac{v_{k+1} - v_k}{h_k} - \frac{2M_k + M_{k+1}}{6} h_k \right) (x - t_k) + \frac{M_k}{2} (x - t_k)^2 + \frac{M_{k+1} - M_k}{6h_k} (x - t_k)^3, \quad x \in [t_k, t_{k+1}], \quad (4)$$

где $h_k \equiv t_{k+1} - t_k$, $M_k \equiv S''_k(t_k)$, $k = 0, 1, \dots, n-1$; $M_n \equiv S''_{n-1}(t_n)$.

Величины M_k определяются из трехдиагональной системы линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} d_1 M_1 + b_1 M_2 = g_1, \\ a_k M_{k-1} + d_k M_k + b_k M_{k+1} = g_k, \quad k = 2, 3, \dots, n-2, \\ a_{n-1} M_{n-2} + d_{n-1} M_{n-1} = g_{n-1}, \end{cases} \quad (5)$$

коэффициенты которой вычисляются по формулам

$$d_1 = 2h_1 + \frac{3h_0(4\alpha_1 - \alpha_2 h_0)}{2(3\alpha_1 - \alpha_2 h_0)}, \quad b_1 = h_1,$$

$$a_k = h_{k-1}, \quad d_k = 2(h_{k-1} + h_k), \quad b_k = h_k, \quad k = 2, 3, \dots, n-2,$$

$$a_{n-1} = h_{n-2}, \quad d_{n-1} = 2h_{n-2} + \frac{3h_{n-1}(4\beta_1 + \beta_2 h_{n-1})}{2(3\beta_1 + \beta_2 h_{n-1})},$$

а правые части – по формулам

$$g_1 = 6 \left(\frac{v_2 - v_1}{h_1} - \frac{v_1 - v_0}{h_0} \right) - \frac{3h_0}{3\alpha_1 - \alpha_2 h_0} \left(d_1 - \alpha_2 \frac{v_1 - v_0}{h_0} \right),$$

$$g_k = 6 \left(\frac{v_{k+1} - v_k}{h_k} - \frac{v_k - v_{k-1}}{h_{k-1}} \right), \quad k = 2, 3, \dots, n-2,$$

$$g_{n-1} = 6 \left(\frac{v_n - v_{n-1}}{h_{n-1}} - \frac{v_{n-1} - v_{n-2}}{h_{n-2}} \right) - \frac{3h_{n-1}}{3\beta_1 + \beta_2 h_{n-1}} \left(d_{n-1} - \beta_2 \frac{v_n - v_{n-1}}{h_{n-1}} \right).$$

Система уравнений (5) эффективно решается с помощью известного метода прогонки [5]. При этом особо подчеркнем, что при наличии условий (3) матрица системы (5) имеет строгое диагональное преобладание, а именно:

$$\begin{aligned} |d_1| &> |b_1|, \\ |d_k| &> |a_k| + |b_k|, \quad 2 \leq k \leq n-2, \\ |d_{n-1}| &> |a_{n-1}|. \end{aligned}$$

Это обеспечивает корректность и устойчивость вычислительного алгоритма метода прогонки [5].

Сглаживание данных методом наименьших квадратов. Пусть зависимость между двумя переменными величинами x и y задается в виде таблицы

$$\frac{x}{y} \left\| \begin{array}{c|c|c|c} x_0 & x_1 & \dots & x_m \\ \hline y_0 & y_1 & \dots & y_m \end{array} \right. . \quad (6)$$

Выберем отрезок аппроксимации $[a, b]$ так, чтобы $a \leq \min_{0 \leq i \leq m} x_i$, $b \geq \max_{0 \leq i \leq m} x_i$. Зададим некоторое разбиение отрезка $[a, b]$ типа (1). Сформулируем следующую задачу: *построить ассоциированный с разбиением (1) кубический сплайн $S(x)$ с краевыми условиями смешанного типа (2), для которого сумма квадратов отклонений*

$$E(v_0, v_1, \dots, v_n) \equiv \sum_{i=0}^m \omega_i [S(x_i) - y_i]^2, \quad (7)$$

где ω_i есть заданный вес в узле t_i , принимает наименьшее значение.

Кубический интерполяционный сплайн $S(x)$ определяется своими значениями $v_0, v_1, \dots, v_n$ в опорных узлах разбиения (1). Тем самым минимизируемая величина зависит от этих значений. Следовательно, поставленную задачу (7) можно переформулировать следующим образом: *найти величины $v_0^*, v_1^*, \dots, v_n^*$, при которых*

$$E(v_0^*, v_1^*, \dots, v_n^*) = \min_{v_0, v_1, \dots, v_n} E(v_0, v_1, \dots, v_n). \quad (8)$$

Построение численного алгоритма решения задачи (8) и его теоретическое обоснование даны в работе [6]. Ниже приводится краткое описание основных этапов алгоритма.

Этап 1. Выявление зависимости величин M_k , $k = 0, 1, \dots, n$, определяемых из системы (5), от величин $v_0, v_1, \dots, v_n$.

Получены выражения

$$M_k = \sum_{j=0}^n \gamma_{kj} v_j + \sigma_k, \quad k = 0, 1, \dots, n$$

для величин M_k , где коэффициенты γ_{kj} и σ_k вычисляются по формулам, зависящим от параметров краевых условий (2) и элементов обратной матрицы H^{-1} ,

где H есть трехдиагональная матрица системы (5). Элементы матрицы H^{-1} вычисляются по выведенным явным формулам.

Этап 2. Выявление зависимости значений сплайна $S(x_i)$, $i = 0, 1, \dots, m$ от величин $v_0, v_1, \dots, v_n$.

Получены выражения

$$S(x_i) = \sum_{j=0}^n a_{ij} v_j + \rho_i, \quad i = 0, 1, \dots, m,$$

где коэффициенты a_{ij} и ρ_i вычисляются через величины, полученные на предыдущем Этапе 1, а именно, через величины γ_{kj} и σ_k .

Этап 3. Вычисление оптимальных значений величин $v_0, v_1, \dots, v_n$ (решение задачи (8)).

Имея величины, вычисленные на Этапах 1 и 2, задача построения сплайна сводится к решению *нормальной* системы

$$A^T \Omega A v = A^T \Omega (y - \rho), \quad (9)$$

где $A = [a_{ij}]_{i=0,1,\dots,m}^{j=0,1,\dots,n}$, $\Omega = \text{diag}[\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_m]$ и $y = [y_0, y_1, \dots, y_m]^T$, $\rho = [\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_m]^T$, $v = [v_0, v_1, \dots, v_n]^T$.

В работе [6] были исследованы свойства матрицы системы (9). А именно, если $m > 3n$ и разбиение (1) отрезка $[a, b]$ таково, что каждый интервал (t_k, t_{k+1}) , $0 \leq k \leq n-1$ содержит по крайней мере три точки x_i из таблицы данных (6), то матрица $A^T \Omega A$ является положительно - определенной.

Описание программного пакета и пользовательского интерфейса. На основе полученных теоретических результатов в среде MatLab был создан программный пакет и работающий в диалоговом режиме графический интерфейс GUI (Graphical User Interface). При этом были использованы общие принципы и методы создания подобных интерфейсов [7,8]. Основное назначение программного пакета – решение задачи сглаживания данных с использованием не только кубических сплайнов, но и алгебраических многочленов, показательных (экспоненциальных), логарифмических и дробно-рациональных функций.

Графический интерфейс GUI управляется с помощью созданных утилитов, в том числе кнопок, меню и других инструментов, представленных в графическом окне (см. рис.). Там же представлены вводимые экспериментальные данные и полученные в результате работы вычислительных алгоритмов аппроксимирующие кривые.

После запуска программы перед пользователем открывается окно графического интерфейса, в котором необходимо либо ввести сглаживаемые данные, либо вызвать файл, с которого программа их считывает. Затем, если рассматривается аппроксимация кубическими сплайнами, вводятся начальные значения параметров краевых условий смешанного типа. Если пользователь в качестве начального данного введет недопустимое значение, то откроется диалоговое окно, в котором появляется предупреждение об ошибке. При нажатии соответствующей кнопки в графическом окне появляется распределение данных. С помощью последовательных нажатий мышки пользователь может зафиксировать опорные узлы кубического сплайна. В соответствующем поле окна появляется число уже отмеченных опорных узлов; в других полях видны текущие координаты курсора.

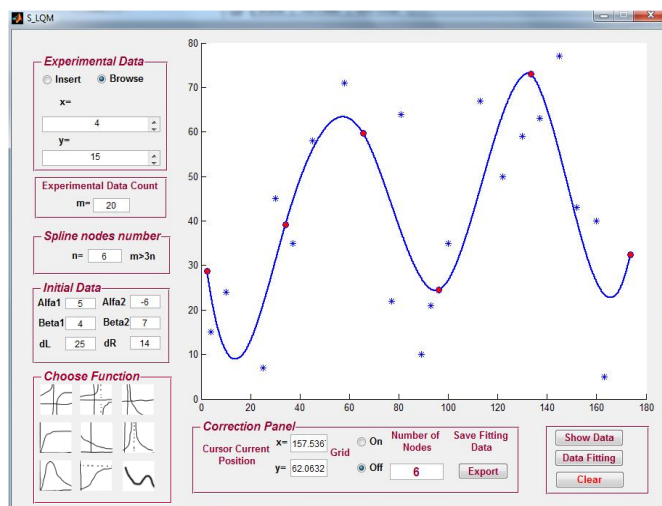


Рис. Аппроксимирующая кривая в окне пользовательского интерфейса

После того как опорные узлы выбраны, запускается программа, и в графическом окне появляется сглаживающая кривая (рис.). Одна из главных особенностей работы интерфейса заключается в том, что пользователь имеет возможность в интерактивном режиме с помощью мышки передвигать опорные узлы кубического сплайна. С изменением опорных узлов соответственно меняется аппроксимирующая кривая. Предусмотрена также кнопка интерфейса, которая экспортирует некоторые данные в файл (например, величины отклонений и координаты опорных узлов).

Заключение. Рассмотренные в работе кубические сплайны с краевыми условиями смешанного типа и полученные результаты могут послужить поводом для более детального теоретического изучения таких функций. Кубические сплайны, включенные в разработанный графический интерфейс, могут использоваться при статистических исследованиях и решении инженерных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж.** Теория сплайнов и ее приложения. – М.: Мир, 1972. – 318 с.
2. **Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошников В.Л.** Методы сплайн-функций. – М.: Наука, 1980. – 352 с.
3. **Мэтьюз Дж., Финк К.Д.** Численные методы: использование MATLAB. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2001. – 720 с.
4. **Խաչատրյան Մ.Գ.** Խառը տիպի եզրային սահմանափակումներով խորանարդային սպլայնի կառուցումը // ՀՊՀՀ Բանբեր. Մոդելավորում, օպտիմալացում, կառավարում. – 2011. – Թոդ. 14, հ.2. – էջ 33-40:
5. **Самарский А.А., Николаев Е.С.** Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 592 с.
6. **Khachatryan M.** Least Squares Fitting with Cubic Splines // Mathematical Problems of Computer Science, Transactions of the Institute for Informatics and Automation Problems of the National Academy of Sciences of Republic of Armenia. – 2012. – V.37. – P. 53-53.
7. **Scott T. S.** MATLAB: Advanced GUI Development. – Dog Ear Publ., Indianapolis, 2006. – 304 p.
8. **Ермачкова Ю.А.** Проектирование интерфейса в среде GUIDE MATLAB // Современные информационные технологии в экономике, управлении и образовании: Сборник материалов Межвузовской научно-практической конференции. – М., 2006. – С. 35-37.

Ереванский государственный университет, Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 03.02.2015.

ՅՈՒ.Ռ. ՀԱԿՈՒՅԱՆ, Մ.Գ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ՀԱՐԹԵՑՄԱՆ ԽՆԴՐՈՒՄ ԽՈՐԱՆԱՐԴԱՅԻՆ ՄՊԼԱՅՆՆԵՐԻ ԿՐԱՌՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Փոքրագույն քառակուսիների մեթոդով դիտարկվում է փորձարարական տվյալների հարթեցման խնդիրը՝ խառը տիպի եզրային պայմաններով խորանարդային սպլայնների կիրառմամբ: Առաջարկվում է այդպիսի սպլայնների կառուցման թվային ալգորիթ: Տրվում է Matlab միջավայրում մշակված օգտագործողի ինտերֆեյսի նկարագրությունը:

Առանցքային բառեր. տվյալների հարթեցում, փոքրագույն քառակուսիների մեթոդ, նորմալ համակարգ, խորանարդային սպլայն, MatLab փաթեթ, գրաֆիկական ինտերֆեյս:

YU.R. HAKOPIAN, M.G. KHACHATRYAN

THE USE OF CUBIC SPLINES IN THE DATA FITTING PROBLEM

The experimental data fitting problem by the least squares method using cubic splines with mixed type boundary conditions is considered. A numerical algorithm for constructing such splines is proposed. A user interface created in Matlab environment is introduced.

Keywords: data fitting, least squares method, normal system, cubic spline, MatLab system, graphical interface.

Վ.Հ. ԹՈՔՄԱԶՅԱՆ

ԽԱՉԵՆԻ ՀԻՂԴՈՂԱՆԳՈՒՅՑԻ ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՎԻՃԱԿԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Խաչենի հիդրոհանգույցի վերաբերյալ լիարժեք տվյալների բացակայության պատճառով անհրաժեշտություն է առաջացել՝ վերականգնելու նախագծային փաստաթղթերը և հետագոտելու պատվարի ու մյուս հիդրոտեխնիկական կառուցվածքների առկա վիճակը: Այդ նպատակով պատվարի մարմնի տարբեր հատվածներում կատարվել են մանրակրկիտ գեոդեզիական չափագրություններ, գրունտի երկրաբանական հետազոտություններ և ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների լաբորատոր փորձարկումներ: Արդյունքում՝ վերականգնվել են պատվարի տեխնիկական փաստաթղթերը, և գնահատվել է նրա փաստացի վիճակը: Ուսումնասիրվել է նաև առանձին կառուցվածքների տեխնիկական վիճակը, կատարվել են համապատասխան եզրակացություններ և առաջարկներ:

Առանցքային բառեր. հիդրոհանգույց, ջուր, պատվար, գրունտ, հիդրոտեխնիկական կառուցվածքներ, ֆիլտրացում, ելք:

Ներածություն. Խաչենի ջրամբարի հիմնական հիդրոտեխնիկական կառուցվածքներն են պատվարը, ոռոգման ու շինարարական թունելները և հեղեղային ելքերը հեռացնող ջրհեռը:

Խաչենի հիդրոհանգույցը կառուցվել ու շահագործման է հանձնվել 1963-64թթ.: Շահագործման հանձնվելուց հետո նմանատիպ կառուցվածքներում նախատեսվում է պարբերաբար իրականացնել տեխնիկական պարամետրերի մոնիթորինգ: Հավաքագրվում են պատվարի և մյուս հիդրոտեխնիկական կառուցվածքների նստվածքների, ֆիլտրացիոն հոսքերի, ամրության, սահքի և կայունության վերաբերյալ տվյալներ, կատարվում են եզրակացություններ կառուցվածքների սահքի, ամրության և կայունության վերաբերյալ [1, 2]:

Տարածքի կլիման բնութագրվում է չափավոր տաք, չոր ձմեռով և շոգ ամառով: Ռելիեֆով դեպի վեր բարձրանալիս այն փոխվում է ցուրտ եղանակով և չոր ձմեռով: Կլիման բնութագրվում է չափավոր տաք՝ ցածր գոտիներում և չափավոր ցուրտ՝ բարձր լեռնային գոտիներում: Օդի տարեկան միջին ջերմաստիճանը 14°C է: Տարվա ամենացուրտ ամիսը հունվարն է, ամենատաքը՝ հուլիսը: Օդի հարաբերական խոնավությունը 80...100% է: Տարեկան մթնոլորտային տեղումների քանակը 500...600 մմ է: Տարեկան կտրվածքով հիմնական տեղումները լինում են ապրիլ-հունիս ամիսներին: Զրամբարի տարածքում ձյան շերտի հաստությունը հասնում է 30...50 սմ-ի: Գրունտի

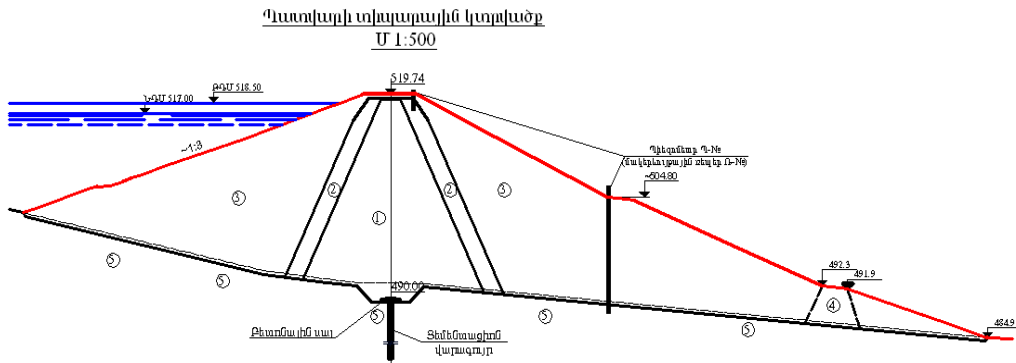
սառեցման առավելագույն խորությունը հասնում է 45 սմ-ի: Ջրամբարի աջափնյա հատվածը ծածկված է խիտ անտառներով, իսկ ձախափնյա հատվածը՝ թփուտներով:

Ուսումնասիրվող տարածքի հիմնական ջրադրությունը Խաչեն գետն է, որը սկիզբ է առնում Փոքր Կովկասի արևելյան լանջերի 2720 մ շրջանից: Գետի երկարությունը 138 կմ է, ջրհավաք ավազանի մակերեսը՝ 1126 կմ²: Գետի միջին տարեկան ծախսերը, Քոլաթաղ գետի միացումից հետո, կազմում են 2,87...6,4 մ³/վրկ, առավելագույնները՝ 15,3...121,0 մ³/վրկ:

Խնայողի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը. Աշխատանքի նպատակ է կատարել Խաչենի հիդրոհանգույցի տեխնիկական վիճակի ուսումնասիրություններ՝ պարզելու կառուցվածքի առանձին հանգույցների հետագա շահագործման հնարավորությունները, մշակելու ինժեներական միջոցառումների ծրագիր, որի իրականացումով պայմաններ կստեղծվեն հիդրոհանգույցի երկարամյա անվտանգ աշխատանքի համար: Նշված նպատակի իրականացման համար նախատեսվել է կատարել.

- պատվարի և նրա առանձին հանգույցների տեխնիկական վիճակի վերլուծություններ,
- ջրամբարի տեխնիկա-տնտեսական հաշվարկի վերլուծություններ,
- ջրամբարում ջրաբերուկների կուտակումների, օգտակար ծավալի հաշվարկներ և ջրամբարի ջրատնտեսական հաշվեկշռի վերլուծություններ,
- պատվարի գրունտի ֆիզիկա-մեխանիկական հատկությունների լաբորատոր ուսումնասիրություններ, երկրաֆիզիկական մեթոդներով պատվարի մարմնի համասեռության չափանիշների գնահատում և պատվարի մարմնով ու կողային պրիզմաներով ծծանցվող կենտրոնացած ելքերի հայտնաբերում և եզրակացությունների կազմում,
- պատվարում տեղակայված առանձին հանգույցների նկարագրություններ և տեխնիկական վիճակի ուսումնասիրություններ, եզրակացությունների կազմում,
- ստատիկ բեռնավորման և սեյսմիկ ուժերի ազդեցության պայմաններում պատվարի ամրության և կայունության հաշվարկներ:

Հետազոտության արդյունքները. Պատվարի բարձրությունը 35,0 մ է (որը նորմերով համապատասխանում է II կարգին), երկարությունը գագաթով՝ 878,6 մ, ձախապարհի երկարությունը գագաթով՝ 909,0 մ: Կատարի լայնությունը տատանվում է 8,5...9,0 մ սահմաններում: Պատվարի կատարի երկայնական ուղղությամբ նիշերը փոփոխական են՝ 519,7...520,0 մ, պատվարի կատարի ճանապարհը ընդլայնական կտրվածքում կառուցված է երկկողմանի թեքությամբ՝ մակերևութային ջրերը հեռացնելու համար: Պատվարի մարմնում տեղադրված է ավազակավային միջուկ, որի գրունտը սուֆոզիոն երևույթներից պաշտպանելու համար իրականացված են միջանկյալ տարբերահատիկ ավազներով անցումային պրիզմաներ (նկ.1):



Նկ. 1. Խաչենի պատվարի կտրվածքը

Հետազոտությունների արդյունքում պարզվել է, որ ավազակավային միջուկի գագաթի նիշը գտնվում է ԲԴՄ-ից ավելի բարձր նիշի վրա:

Պատվարի վերին շեպը պատված է ճնշած փամպի իրականացված ե/բ սալերով, թեքությունը մոտավորապես 1:3,0 է: Գեոդեզիական հետազոտությունները կատարվել են կատարից մինչև ջրի մակարդակի նիշը 503,5 լ, իսկ այդ նիշից ցածր՝ խորացված: Վերջին տարիներին իրականացվել են վերին շեպի ե/բ սալերի վերանորոգման աշխատանքներ:

Ստորին շեպը նախատեսված է եղել ամրացնել բուսական շերտով: Շեպի թեքությունները տատանվում են 1:2,1-ից մինչև 1:2,7 սահմաններում:

Երկրաբանական և լաբորատոր հետազոտությունների արդյունքում ստացվել են պատվարի մարմնի մաս կազմող վերին և ստորին պրիզմաների ճալաքարա-կոպչային գրունտների հատիկաչափական կազմի և ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների մասին տվյալներ:

Պատվարի տեխնիկական վիճակի գնման արդյունքում բացահայտվել են առկա թերությունները, և առաջարկվել են ինժեներական միջոցառումներ՝ դրանք վերացնելու համար:

Ջրամբարի տեխնիկական ցուցանիշները ստուգաճշտելու նպատակով կատարվել են գեոդեզիական չափագրական աշխատանքներ, որի արդյունքում որոշվել են ջրամբարի օգտակար և մեռյալ ծավալները, ջրամբարում կուտակված ջրաբերուկների քանակը:

Խաչենի պատվարի հորիզոնական և ուղղաձիգ տեղաշարժերի, պատվարի մարմնով ֆիլտրացիոն հոսքերի, դեպրեսիոն կորի դիրքի, ջրամբարում ջրի հորիզոնի, կառուցվածքներից ֆիլտրացվող ելքերի որոշման համար, շահագործման ընթացքում չափագրություններ իրականացնելու նպատակով, տեղադրվել են հենակետային, մակերևութային հենանիշ նշաձողեր, պլեզոմետրեր, հիդրոմետրական դիտակետեր:

Ուսումնասիրությունների արդյունքում կազմվել են գոյություն ունեցող հսկիչ-չափիչ սարքավորումների տեղաբաշխման չափագրություններ և դրանց տեխնիկական վիճակի վերլուծություններ, որի ընթացքում բացահայտվել են առկա թերությունները, և կատարվել են առաջարկություններ՝ դրանք վերացնելու համար:

Հեղեղային ջրիեռը հորանային ջրընդունիչով և հորիզոնական թունելով կառույց է, որը նախատեսված է 1% ապահովության՝ 168 u^3 էլքեր հեռացնելու համար: Հորանափողը կազմված է ուղղահայաց և հորիզոնական փորվածքների սահուն լծորդումով ծնկաձև երկաթբետոնե փորվածքներից: Արտաքին մասի տրամագիծը տատանվում է 16,70...17,95 u ՝ սահմաններում: Երեսարկը կառուցված է միաձույլ երկաթբետոնով, սակայն նկատվում են քայքայված մասերում նոր իրականացված ճնշածեփվածքի հետքեր: Հեղեղային ջրիեռի հորիզոնական հատվածն ունի 295 u երկարություն, թեքությունը՝ $i=0,06$: Լայնական կտրվածքը շրջանաձև է՝ 4,70 u տրամագծով, երեսարկը միաձույլ երկաթբետոնից է:

Պատվարի մարմնի գրունտների ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների լաբորատոր ուսումնասիրությունը ցույց է տալիս, որ մոտ 50 տարվա գործունեության ընթացքում պատվարի մարմինը լուրջ փոփոխությունների չի ենթարկվել: Պատվարի մարմինը, իրականացված ճալաքարա-կոպչային գրունտներով, ունի հետևյալ պարամետրերը՝ խտությունը 2,11 g/cm^3 , ներքին շփման անկյունը 38°. ներկայումս դրանք էական փոփոխություններ չեն կրել: Պատվարի միջուկը, իրականացված ավազակավով, ունի հետևյալ ֆիզիկամեխանիկական հատկությունները՝ խտությունը՝ 1,97 g/cm^3 , խոնավությունը՝ 22,1%, կմախքի խտությունը՝ 1,61 g/cm^3 , ներքին շփման անկյունը՝ 18°40', շաղկապման ուժը՝ 0,037 $U_{\text{Պա}}$: Վերլուծելով գրունտների ներկայիս ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների ցուցանիշները, կարելի է ասել, որ պատվարի մարմինը կայունության տեսակետից գտնվում է նորմատիվային սահմաններում:

Խաչենի պատվարը նախագծվել ու հաշվարկվել է սեյսմիկ բեռների 0,2g հորիզոնական արագացման պայմաններում: Սակայն պատվարի կառուցումից հետո տարածաշրջանին ներկայացվող սեյսմիկ պահանջները խստացվել են, և անհրաժեշտություն է առաջացել վերստուգել պատվարի ամրությունը և շեպի կայունությունը սեյսմիկ ուժերի նոր պայմաններում, որի արդյունքում որոշվել է սեյսմիկ գոտիականությունը: Պատվարի հիմքում առավելագույն հորիզոնական արագացումը հավասար է 0,3g:

Ուսումնասիրությունները ցույց են տվել, որ պատվարների ամրության և կայունության չափորոշիչները գնահատելիս չի կարելի օգտագործել միևնույն հաշվարկային մոդելները: Դասական շրջանագլանային մեթոդը, որի եղանակները բերված են մեր ուսումնասիրություններում, ցույց են տալիս ավելի փոքր պատվարների կայուն

լինելու հանգամանքը, սակայն բարձր պատվարներում, որտեղ բացի պատվարի չափերից դեր է խաղում նաև այդ տարածքի հորիզոնական արագացման կտրուկ աճը, կայունության գործակիցը ստացվում է մեկից փոքր [3]:

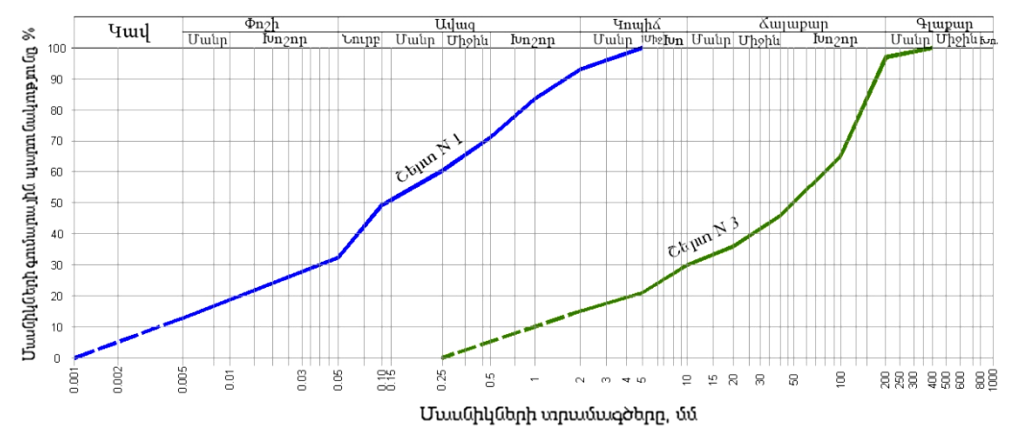
Պատվարի ուղղահաստածքի տեղը Խաչեն գետի վրա ընտրվել է՝ հաշվի առնելով տարածքի տեղագրական, ինչպես նաև երկրաբանական, ջրաբանական, շինարարական աշխատանքների կազմակերպման և այլ առանձնահատկությունները (գործնականում ուղղահաստածք ասելով ընդունված է հասկանալ որոշակի լայնությամբ շերտ, որի վրա տեղադրվում են հիդրոտեխնիկայի հիմնական կառուցվածքները): Ուղղահաստածքի տեղն ընտրելիս որոշակի դերն են ունեցել նաև բնական ու տեղական պայմանները, այդ թվում՝ փոքր ու մեծ վտակների առկայությունը, որոնց ջրերը հաշվի են առնվել ջրամբարի ծավալներում: Պատվարի ընտրված ուղղահաստածքը Խաչեն գետի այլ հատվածների համեմատ հնարավոր ամենանպաստավորն է:

Հաշվի առնելով տեղական շինարարական էժան նյութերի բավարար քանակությունը, հողային և ժայռային աշխատանքների կատարման համար անհրաժեշտ շինարարական մեխանիզմների առկայությունը՝ ընդունվել է գրունտային պատվարի տարբերակը: Գրունտային պատվարների առավելություններից է այն, որ իրականացման համար հնարավոր է գործնականում օգտագործել ցանկացած տեղական գրունտ: Գրունտային պատվարների դեպքում առանձնակի պահանջներ չեն ներկայացնում հիմնատակի դեֆորմացիաներին: Նորմերին համապատասխան իրականացված գրունտային պատվարները երկրաշարժի դեպքում հիմնականում պահպանում են իրենց ամրությունն ու կայունությունը: Գրունտային պատվարների հիմնական առավելություններից մեկն էլ այն է, որ ժամանակի ընթացքում պատվարի գրունտները պահպանում են իրենց հատկությունները (որոշ դեպքում նույնիսկ լավանում են): Գրունտային պատվարների թերություններից են. չի թույլատրվում հեղեղային ելքերը հեռացնել պատվարի կատարի վրայով, իսկ ֆիլտրացվող ջրերի հոսքը պատվարի զանգվածի դեֆորմացիաների ու սուֆոզիոն երևույթների հնարավորություն է ստեղծում: Պատվարն ըստ բարձրության դասվում է միջին պատվարների շարքը, քանի որ ջրի առավելագույն ճնշումը տատանվում է 15...50 տ/սահմաններում: Պատվարը համարվում է II կարգի կառուցվածք: Հետազոտությունների արդյունքում պարզվել է, որ պատվարն իրականացված է լիցքի տեղադրման արհեստական խտացմամբ: Պատվարը անհամասեռ է՝ սակավաջրաթափանց գրունտներով իրականացված միջուկով: Պատվարի միջուկն իրականացվել է կախված ատամով:

Հատիկաչափական կազմի և դրա ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների վերաբերյալ փաստացի տվյալներ ունենալու նպատակով իրականացվել են հորատման աշխատանքներ: Պատվարի վրա հորատվել են երեք հորատանցքեր՝ 13,5...19,5մ/

խորությամբ: Հորատանցքերից վերցվել են փորձանմուշներ (6 փորձանմուշ) լաբորատոր ուսումնասիրությունների համար:

Պատվարի մարմնի հետազոտության արդյունքում ստացված գրունտների հատիկաչափական կազմը և դրա ֆիզիկամեխանիկական հատկությունները ներկայացված են նկ. 2-ում և աղյուսակում:



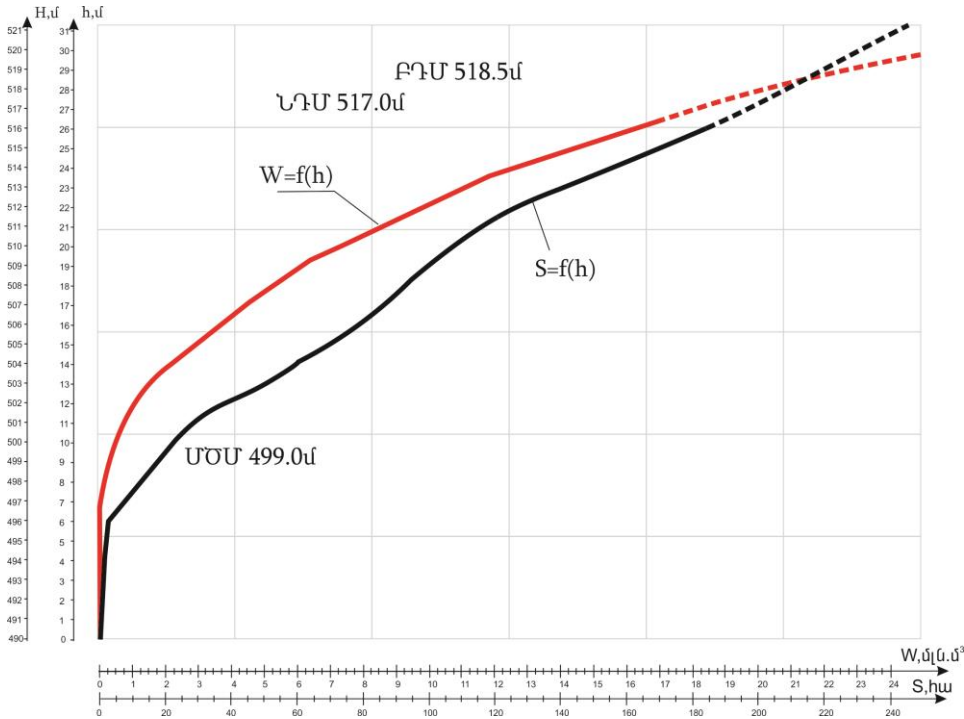
Նկ. 2. Պատվարի մարմնի գրունտների հատիկաչափական կազմի կորերը

Աղյուսակ

Պատվարի գրունտների ֆիզիկամեխանիկական հատկությունները

Հերթերի համար №	Տեսակարար կշիռ, գ/սմ³	Ծավալային կշիռ,գ/սմ³	Խտնակություն, %	Կոմակի ծավալային խտնակություն	Ծավալականության գործակիցը	Զրահագեցածության գործակիցը	Պլաստիկության վերին	Պլաստիկության ներքին	Պլաստիկության թիվը , %	Կոմախտնեցիան	Ներքին շփման անկյունը	Շաղկապման ուժը, ՄՊա	Դեֆորմացիայի մոդուլը, ՄՊա	Մեխանիկ կարգը	Գրունտների խումբը ըստ ՇՆՆԿ IV-2-82 Ժ-1/Ժ-3	Ֆիլտրացիայի գործակից, մ/օր
1	2,66	1,97	22,1	1,61	0,65	0,90	29,9	18,8	11,1	0,29	18°40'	0,037	10,72	2	33 ⁴ /33 ⁴	0,01
2	2,69-2,71	1,75-1,80	-	-	-	-	-	-	-	-	28-30°	-	18,0-20,0	-	27 ⁴ /28 ⁴	3...5
3	2,71	2,11	9,4	1,93	0,32	-	-	-	-	-	38°	-	26,3	2	6 ⁹ /5 ⁹	5...7
4	2,71-2,73	2,05-2,09	-	-	-	-	-	-	-	-	36...38°	-	28...32	-	19/20 ^ա	45...50

Խաչենի ջրամբարի հայելային մակերեսի և ծավալի կախվածության կորերը բարձրությունից ներկայացված են նկ. 3-ում:



Նկ. 3. Խաչենի ջրամբարի հայելային մակերեսի և ծավալի կախվածության կորերը բարձրությունից

Բերված տվյալները արդյունք են տարբեր ժամանակահատվածներում (04.06.2013, 24.06.2013, 03.09.2013, 29.09.2013) կատարված հետազոտությունների: Արդյունքում՝ ջրամբարի բարձր դիմհարային մակարդակի նիշը (ԲԴՄ) – 518,5 մ է, նորմալ դիմհարային մակարդակի նիշը՝ (ՆԴՄ) 517,0 մ, մեռյալ մակարդակի նիշը՝ (ՄԾՄ)–499,0 մ: Պատվարի երկարությունը գազաթով 878,6 մ է (Նկ0+16փՆկ8+94,6), ճանապարհի երկարությունը գազաթով՝ 909,0 մ: Կատարի ընդհանուր լայնությունն իրականացված է որոշակի շեղումներով, այն տատանվում է 8,5...9,0 մ: Պատվարի կատարի երկայնական ուղղությամբ նիշերը փոփոխական են՝ 519,7...519,8 մ, պատվարի կատարի ընդլայնական կտրվածքում ճանապարհին տրված է երկկողմանի թեքություն՝ մակերևութային ջրերը հեռացնելու համար: Ստորին շեպի և գազաթի միջև գտնվող տարածքում անկանոն կերպով աճել են ծառեր և թփեր, որոնք անհրաժեշտ է վերացնել:

Ստորին շեպի ոչ ճիշտ հարթեցման և տեղային փոքր սահքերի պատճառով նույն առափը տարբեր հատվածներում ունի տարբեր լայնություններ: Առափներն

ունեն խորդուբորդ մակերեսներ: Առափներն անհրաժեշտ է բերել կանոնավոր տեսքի՝ լայնությունները համապատասխանեցնելով իրենց շահագործման նպատակներին: Անհրաժեշտ է որոշ առափներում ստեղծել պայմաններ՝ մուտք ապահովելով ոչ միայն շահագործող անձնակազմի, այլև տրանսպորտային միջոցների համար: Ստորին շեպում անհրաժեշտ է իրականացնել հարթեցման աշխատանքներ և ամբողջ երկարությամբ վերականգնել առափների երթևեկելի մասերի ճալաքարային ծածկույթը:

Պատվարի մարմնի ձախակողմյան և աջակողմյան ֆիլտրվող հոսքերի հեռացման համար դրենաժային համակարգ, որպես այդպիսին, չի նկատվել: Անհրաժեշտ է պատվարի մարմնից, ինչպես նաև կողերից ֆիլտրացիոն ջրերի հեռացման համար ստորին բիեֆի աջակողմյան հատվածում իրականացնել հողային կամ ե/բ կիսախողովակներով առվակ: Ջրամբարի ստորին բիեֆի երկու հատվածներում նկատվում են ֆիլտրացիոն ջրերի ելքեր:

Առաջին տեղամասում, որն ընդգրկում է ՆԿ 4+00-ից մինչև ՆԿ 5+10-ի միջև ընկած հատվածը, ֆիլտրացման ջրերը դուրս են գալիս պատվարի քարային բանկետի տակից դեպի ստորին բիեֆ, որոնց ծախսը կազմում է 25...30 լ/վ: Այդ ջրերը ներքին բիեֆի տարածքում առաջացրել են ճահճուտ: Ճահճային հատվածից ջրերը ինքնահոս եղանակով գետի հին հունով հոսում են դեպի ներքև:

Երկրորդ տեղամասն ընդգրկում է ՆԿ 8+00-ից մինչև վթարային ջրհեռն ընկած հատվածը: Այս հատվածում ներքին բիեֆի ֆիլտրացիոն ջրերի ելքերը նկատելի են մի քանի ջրաղբյուրների տեսքով, որոնք զբաղեցնում են 30մ² լայնությամբ տարածք: Ֆիլտրացիոն ջրերի ծախսը կազմում է 15...20 լ/վ:

Հեղեղային ջրհեռն անցնում է ջրամբարի աջակողմյան լանջի տակով՝ ժայռային (պորֆիրիտային) գրունտների միջով: Հեղեղային ջրհեռը հորանային ջրընդունիչով և հորիզոնական թունելով հիդրոկառույց է: Ըստ հիդրոլոգիական և տրանսֆորմացիայի հաշվարկների՝ հեղեղային ջրթափն ապահովում է 1% ապահովվածությամբ հաշվարկային 168 մ³ ելքի անցումը դեպի ստորին բիեֆ:

Հորանային ջրընդունիչը ներկայացնում է շրջանային ջրթափով երկաթբետոնե կառույց: Հորանափողը կազմված է ուղղահայաց և հորիզոնական փորվածքների սահուն լծորդումով ծնկաձև երկաթբետոնե փորվածքներից: Արտաքին մասի տրամագիծը տատանվում է 16,70...17,95 մ սահմաններում: Երեսարկը կառուցված է միաձույլ երկաթբետոնով, սակայն նկատվում են քայքայված մասերում նոր իրականացված ճնշածեփված բետոնի հետքեր: Հորանափողի ներսում նկատվում են վերանորոգման ժամանակ օգտագործված ցցված ամրաններ, որոնք հեղեղների ժամանակ կարող են իրենց վրա հավաքել բերվածքներ և նեղացնել ջրհեռի լայնական կտրվածքը, հետևաբար՝ նվազեցնել նրա թողունակությունը: Անհրաժեշտ է վերականգնել ճնշածեփված բետոնի շերտը և ապամոնտաժել ցցված ամրանները:

Հեղեղային ջրհեռի հորիզոնական հատվածն ունի 295 մ երկարություն, թեքությունը՝ $i=0,06$: Լայնական կտրվածքը շրջանաձև է, ունի 4,70 մ տրամագիծ, երեսարկը՝ միաձույլ երկաթբետոնից է: ՆԿ 0+90, ՆԿ 1+20 և ՆԿ 2+10 ուղեհատվածներում նկատվում են հակադարձ նմանատիպ թաղի երկաթբետոնե երեսարկի քայքայված մասերը, դուրս գցված ամրանային ձողերը: Այդ հատվածներում առաջացած փոսերակների չափերը տատանվում են 0,4...0,5 մ խորությամբ 0,6x1,1 մ² մակերեսի սահմաններում: Միաձույլ ե/բ երեսարկի տակից առկա է ինտենսիվ ջրագատում, ինչը թույլ է տալիս ենթադրել, որ թունելի ե/բ երեսարկի և շրջակա ապարների միջև գոյություն ունեն դատարկություններ, որոնք կարող են թունելի կայունության նվազման պատճառ դառնալ: Անհրաժեշտ է վերացնել վերը նշված թերությունները, այդ թվում՝

ա) մշակել առաջացած փոսերը և բետոնապատել, վերականգնել դեֆորմացված ամրանային ձողերը,

բ) կատարել հեղեղային ջրհեռի ամբողջ երկարությամբ ստուգողական լցամիման ցեմենտացում՝ հայտնաբերելու և վերացնելու համար ի հայտ եկած դատարկությունները,

գ) մշակել հեղեղային ջրհեռի հեռացնող ջրանցքի ափերը, ստեղծել հնարավորություն՝ շահագործման ընթացքում դեպի թունել ազատ և անվտանգ մուտք գործելու համար:

Եզրակացություն. Հետազոտական համալիր աշխատանքների իրականացմամբ ամբողջացվել է Խաչենի պատվարի և մյուս հիդրոտեխնիկական կառուցվածքների առկա վիճակի պատկերը, ինչը կարող է անհրաժեշտ նախապայմաններ ստեղծել ջրամբարի անվտանգ և հուսալի շահագործումն ապահովելու համար:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Саруханян А.А., Веранян Г.Г.** Об оценке критериев безопасности грунтовых плотин в условиях сейсмических воздействий // Вестник Государственного инженерного университета Армении (Политехник). Серия "Гидрология и гидротехника".- 2014. - Вып.17, N1.- С. 94-101.
2. **Токмаджян В.О., Габаян Г.С.** Применение логического моделирования при определении генезиса аномалий на плотинах // Вестник Государственного инженерного университета Армении (Политехник). Серия "Гидрология и гидротехника".- 2014. - Вып.17, N1.- С. 60-67.
3. **Sarukhanyan A., Manukyan A.** The Technical Data Analysis Of Khachen Reservoirs Hydrosystem // Conference book, 6th International Conference on Contemporary of Architecture & Construction, 24-27 June 2014.- Ostrava, Czech Republic, 2014. -P.135.

В.О. ТОКМАДЖЯН

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ХАЧЕНСКОГО
ГИДРОУЗЛА**

В связи с отсутствием полных данных относительно Хаченского гидроузла возникла необходимость восстановления проектных документов и исследования нынешнего состояния дамбы и других гидротехнических конструкций. С этой целью на разных участках дамбы проведены детальные геодезические обмеры, геологические исследования и лабораторные испытания физико-механических характеристик грунта. На основе полученных результатов восстановлены технические документы нынешнего состояния дамбы и других гидротехнических конструкций. Проведены также исследования технического состояния отдельных конструкций и сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: гидроузел, вода, дамба, грунт, гидротехнические конструкции, фильтрация, выход.

V.H. TOKMAJYAN

STUDYING THE KHACHEN RESERVOIR ENGINEERING STATE

The lack of complete data on the Khachen reservoir requires reconstruction of the dam and other hydraulic structures. To this end, in different sections of the dam, thorough geodesic measurements, geological investigations of the ground, and laboratory tests of its physical-and-mechanical properties have been carried out. As a result, the technical documents concerning the current state of the dam and other hydroengineering structures have been restored. The technical state of separate structures has been studied and respective conclusions have been made.

Keywords: reservoir, water, dam, soil, hydraulic structure, filter, outflow.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Գ.Լ., ԱՐՁՈՒՄԱՆՅԱՆ Մ.Գ., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Հ.Գ.

ԳԼԱՆԱԿԱՆ ՄԱՍԼԱՄԱՅՐՈՒՄ ՓՈՇԵՆՅՈՒԹԻ ԽՏԱՅՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ
ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՈՐՈՇ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՄԱՍԻՆ..... 119

ԱՍՍԱՏՐՅԱՆ Զ.Ա., ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Ս.Ս.

ԿԱՆՈՆԱՎՈՐ ՁԵՎԻ ՈՐՄԱՔԱՐԵՐԻ ԱՆՄԱՅՈՐԴ ՀԱՆՈՒՅԹԻ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱ ԵՎ
ԱՆՎԱՎՈՐ ՄԵՔԵՆԱ..... 130

ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ս.Գ., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Ա.Ա., ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Վ.Գ.

ԱԼՅՈՒՄԻՆԱՅԻՆ ՀԱԿԱՇՓԱԿԱՆ ՓՈՇԵՀԱՄԱՁՈՒՎԱԾՔՆԵՐԻ
ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱԳՈՅԱՑՄԱՆ ՍԿԶԲՈՒՆՔՆԵՐԸ..... 138

ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ Ս.Գ., ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Վ.Հ.

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԹԵՐԹԱՔԱՐԱՅԻՆ ԱԾՈՒԽՆԵՐԻՑ ՈՍԿՈՒ ԵՎ ԱՐԾԱԹԻ ԿՈՐԶՄԱՆ
ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ..... 149

ՀՈՎՄԵՓՅԱՆ Ա.Հ.

ՄՈԼԻԲԴԵՆԻ ՍՈՒԼՖԻԴԱՅԻՆ ԽՏԱՆՅՈՒԹԵՐԻ ՀԱՄԱԼԻՐ ՎԵՐԱՄՇԱԿՈՒՄԸ..... 154

ՌԱՖՅԱՆ Ռ.Ա., ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ Ո.Զ., ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Ռ.Գ.

ԳՏՏ ԿՈՄՊՐԵՍՈՐ ՆԵՐՇՈՎՈՂ ՕԴԻ ՋՐԱՅԻՆ ՄՇՈՒՇԱՊԱՏՄԱՄԲ ՀՈՎԱՅՄԱՆ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԻՐԱՌՄԱՆ ՏԵԽՆԻԿԱՏՆԵՍԱԿԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿ (ԵՐԶԷԿ-Ի
ՕՐԻՆԱԿՈՎ)..... 163

ԱԿԱՐՄԱԶՅԱՆ Ա.Ս.

ՓՀԷԿ-Ի ԳԵՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ՄՈՆԻԹՈՐԻՆԳԻ ՄԵԹՈԴԱԲԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ:
ՎԻՃԱԿԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ ԵՎ ԱՌԱՋԱՐԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ..... 169

ՀԱՅԿԱԶՅԱՆ Մ.Է.

ՋԱՅՆԱՕՊՏԻԿԱՅԻ ԽՆԴԻՐՆԵՐՈՒՄ ՓՈՐՁՆԱԿԱՆ ՏՎՅԱԼՆԵՐԸ ՄՇԱԿԵԼԻՍ
ՎԵՅՎԼԵԹ-ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅԱՆ ՄԵԿ ԿԻՐԱՌՄԱՆ ՄԱՍԻՆ..... 178

ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Ռ.Մ., ՂՈՒԼՅԱՆ Ա.Գ., ՓԻՐՈՒՄՅԱՆ Հ.Ա., ՄԱՐԳՍՅԱՆ Ս.Ա.,

ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Գ.Ս.

PT-13 ИПА РАН ՌԱԴԻՈԴԻՏԱԿԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՉԱՓՈՒՄԸ..... 189

ԱՅՎԱԶՅԱՆ Կ.Գ., ԽՈՒՂԱՎԵՐԴՅԱՆ Ս.Խ.

ՄԱՍՆԱԿԻՈՐԵՆ ՍՏՎԵՐՎԱԾ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹՈՎ ԱՐԵՎԱՅԻՆ ՄՈԴՈՒԼԻ
ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ ԵՎ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ..... 198

ՄԱՐԴՈՅԱՆ Գ.Ռ., ՀՈՎՄԵՓՅԱՆ Ժ.Մ.

ԿՈԴԱՅԻՆ ՏԱՐԱՆՋԱՏՄԱՄԲ ՎԱՐԺԵՅՆՈՂ ԱԶԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՈՒՄՈՎ
ԲԱԶՄԱԿԻ ՄՈՒՏՔԵՐՈՎ ԵՎ ԲԱԶՄԱԿԻ ԵԼՔԵՐՈՎ (MIMO) ԿԱՊՈՂՈՒ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ
ԵՂԱՆԱԿ..... 205

ԱԶՈՅԱՆ Ս.Ս.

ԳԵՐԲԱՐՁՐ ՀԱՃԱԽՈՒԹՅԱՄԲ ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԻԿ ԲԱԺԱՆԻՉԻ
ԱՄՊԼԻՏՈՒԴԱ-ՀԱՃԱԽԱՅԻՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ..... 213

ԱՂԱԶԱՆՅԱՆ Ա.Ա.

ՌԱԴԻՈ-ՀԱՃԱԽԱՅԻՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ՓՈՒԼԱՅԻՆ ՇԵՂՄԱՆ ՉԱՓՄԱՆ
ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏ ԵՂԱՆԱԿ..... 220

ՄԻՄՈՆՅԱՆ Ս.Հ., ԱՂԱՄՅԱՆ Մ.Ա.	
ԳԾԱՅԻՆ ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ՎԵՐՋԱՎՈՐ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ՈՐՈՇ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ	225
ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Տ.Ն., ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Ն.Հ., ԽԱՐԻՍՈՎ Ե.Ռ., ԳԱՄՊԱՐՅԱՆ Օ.Ն., ՀՈՎԱԿԻՍՅԱՆ Ն.Գ.	
ԲԱԶՄԱԶԱՓ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐՈՒՄ L1 ՀԱՐՄԱՐՎՈՂ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ԿԻՐԱՌՄԱՆ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ: ՄԱՍ 2. ՄԻԱՏԻՊ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐ	238
ՀԱԿՈԲՅԱՆ ՅՈՒ.Ռ., ԽԱԶՏՏՐՅԱՆ Մ.Գ.	
ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ՀԱՐԹԵՑՄԱՆ ԽՆԴՐՈՒՄ ԽՈՐԱՆԱՐԴԱՅԻՆ ՍՊԼԱՅՆՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ.....	250
ԹՈՔՄԱՋՅԱՆ Վ.Հ.	
ԽԱԶԵՆԻ ՀԻԴՐՈՀԱՆԳՈՒՅՑԻ ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՎԻՃԱԿԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ	257

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕТРОСЯН Г.Л., АРЗУМАНЯН М.Г., ПЕТРОСЯН А. Г.	
О НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРАХ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ	119
АСАТРИАН Д.Ж. А., АРУТЮНЯН С.С.	
ТЕХНОЛОГИЯ И КОЛЕСНАЯ МАШИНА ДЛЯ БЕЗОСТАТОЧНОЙ ДОБЫЧИ КАМНЯ ПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ.....	130
АГБАЛЯН С.Г., ПЕТРОСЯН А.А., ВАРДАНИЯН В.Г.	
ПРИНЦИПЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ СПЛАВОВ.....	138
АЙРАПЕТАН С.Г., МАРТИРОСЯН В.А.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА ИЗ СЛАНЦЕВЫХ УГЛЕЙ АРМЕНИИ	149
ОВСЕПЯН А.О.	
КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА СУЛЬФИДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ МОЛИБДЕНА	154
РАФЯН Р.А., МАРУХЯН В.З., ХАЧАТРИАН Р.Г.	
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОСТУПАЮЩЕГО В КОМПРЕССОР ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ВОЗДУХА ВОДЯНЫМ ТУМАНООБРАЗОВАНИЕМ (НА ПРИМЕРЕ ЕрТЭЦ).....	163
АКАРМАЗЯН А.С.	
МЕТОДОЛОГИЯ МОНИТОРИНГА ГЕНЕРАТОРОВ МАЛЫХ ГЭС: АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	169
АЙКАЗЯН М.Э.	
ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ АКУСТООПТИКИ	178
МАРТИРОСЯН Р.М., ГУЛЯН А.Г., ПИРУМЯН Г.А., САРКИСЯН С.А., АВЕТИСЯН Г.С.	
ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИОТЕЛЕСКОПА РТ-13 ИПА РАН	189
АЙВАЗЯН К.Г., ХУДАВЕРДЯН С.Х.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНО ЗАТЕНЕННЫХ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ	198
МАРДОЯН Г.Р., ОВСЕПЯН Ж.М.	
МЕТОД ОЦЕНКИ КАНАЛА С МНОЖЕСТВЕННЫМИ ВХОДАМИ И МНОЖЕСТВЕННЫМИ ВЫХОДАМИ (ММО) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕНИРОВОЧНЫХ СИГНАЛОВ С КОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ	205
АЗОЯН М.С.	
АНАЛИЗ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ДЕЛИТЕЛЯ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ	213
АГАДЖАНИЯН А.А.	
ЭФФЕКТИВНЫЙ РАДИОЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СДВИГА ФАЗ	220
СИМОНЯН С.О., АДАМЯН М.А.	
К НЕКОТОРЫМ МЕТОДАМ РЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНЕЧНЫХ УРАВНЕНИЙ.....	225

ОГАННИСЯН Т.Н., ВАРДАНЯН Н.А., ХАРИСОВ Е.Р., ГАСПАРЯН О.Н., ОВАКИМЯН Н.Г.	
О ПРИМЕНЕНИИ L1 АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В МНОГОМЕРНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ. ЧАСТЬ 2. ОДНОТИПНЫЕ СИСТЕМЫ.....	238
АКОПЯН Ю.Р., ХАЧАТРЯН М.Г.	
ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КУБИЧЕСКИХ СПЛАЙНОВ В ЗАДАЧЕ СГЛАЖИВАНИЯ ДАННЫХ.....	250
ТОКМАДЖЯН В.О.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ХАЧЕНСКОГО ГИДРОУЗЛА.....	257

CONTENTS

PETROSYAN G.L., ARZUMANYAN M.G., PETROSYAN H.G. ON SOME PARAMETERS OF POWDER COMPACTION PROCESS CALCULATION IN A CYLINDRICAL DIE	119
ASATRYAN J.A., HARUTYUNYAN S.S. A TECHNOLOGY AND A WHEEL MACHINE FOR SURPLUS QUARRYING WALL STONE OF A CORRECT FORM.....	130
AGHBALYAN S.G., PETROSYAN A.A., VARDANYAN V.G. PRINCIPLES OF STRUCTURIZATION OF ALUMINIUM ANTIFRICTION POWDER ALLOYS	138
HAYRAPETYAN S.G., MARTIROSYAN V.H. INVESTIGATING THE POSSIBILITY OF EXTRACTING GOLD AND SILVER FROM COAL SHALES IN ARMENIA.....	149
HOVSEPYAN A.H. COMPLEX PROCESSING OF SULPHIDE CONCENTRATES OF MOLYBDENUM.....	154
RAFYAN R.A., MARUKHYAN V.Z., KHACHATRYAN R.G. TECHNICAL AND ECONOMIC CALCULATIONS OF GT COMPRESSOR INTAKE AIR COOLING SYSTEM BY FOGGING (ON YCCPP EXAMPLE).....	163
AKARMAZYAN A.S. A METHODOLOGY FOR MONITORING THE SHPP GENERATORS: ANALYSIS OF THE STATE AND RECOMMENDATIONS.....	169
HAYKAZYAN M.E. AN APPROACH TO THE USE OF THE WAVELET-ANALYSIS FOR EXPERIMENTAL DATA PROCESSING IN PROBLEMS OF ACOUSTOOPTICS	178
MARTIROSYAN R.M., GULYAN A.G., PIRUMYAN H.A., SARGSYAN S.A., AVETISYAN G.S. MEASURING THE RADIOTELESCOPE PARAMETERS	189
AYVAZYAN K.G., KHUDAVERDYAN S.K. MODELING AND INVESTIGATING THE CHARACTERISTICS OF PARTIALLY SHADED SOLAR MODULES	198
MARDOYAN G.R., HOVSEPYAN J.M. A MULTIPLE-INPUT MULTIPLE-OUTPUT (MIMO) CHANNEL ESTIMATION METHOD BY TRAINING SIGNALS WITH CODE-DIVISION	205
AZOYAN M.S. ANALYSIS OF THE AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR PARAMETRIC DIVIDER OF A MICROWAVE.....	213
AGHAJANYAN A.A. AN EFFICIENT RF METHOD FOR PHASE SHIFT MEASUREMENT.....	220
SIMONYAN S.H., ADAMYAN M.A. SOME METHODS FOR SOLVING LINEAR ONE-PARAMETER SYSTEMS OF FINITE EQUATIONS	225

HOVANISSYAN T.N., VARDANYAN N.H., KHARISOV E.R., GASPARYAN O.N., HOVAKIMYAN N.V.	
ON APPLICATION OF L_1 ADAPTIVE CONTROL TO MULTIVARIABLE CONTROL SYSTEMS. PART 2. UNIFORM SYSTEMS	238
HAKOPIAN Yu.R., KHACHATRYAN M.G.	
THE USE OF CUBIC SPLINES IN THE DATA FITTING PROBLEM.....	250
TOKMAJYAN V.H.	
STUDYING THE KHACHEN RESERVOIR ENGINEERING STATE	257