

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

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ
ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ
ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

Հատոր 72

N 2

ԱՊՐԵԼ – ՀՈՒՆԻՍ

ԵՐԵՎԱՆ 2019

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И
НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Том 72

N 2

АПРЕЛЬ – ИЮНЬ

ЕРЕВАН 2019

PROCEEDINGS

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

SERIES OF TECHNICAL SCIENCES

Volume 72

N 2

APRIL - JUNE

YEREVAN 2019

Журнал издается с 5.01.1948 г.

Выходит 4 раза в год

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Գլխավոր խմբագիր՝ Մելիքյան Վ.Շ., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Գլխ. խմբագրի տեղակալ՝ Գրիգորյան Ա.Խ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Պատասխանատու քարտուղար՝ Մեյրանյան Ժ.Ս., ՀՀ
Խմբագրական կոլեգիա՝
Աղբալյան Ս.Գ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Ասլանյան Լ.Հ., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Բաղդասարյան Ն.Պ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Բաղդասարյան Հ.Վ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Բաղդասարյան Ս.Ք., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Գագարինսկի Ա.Յու., ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Գոնելյան Ս., տ.գ.թ., Եգիպտոս
Գրիմբլաթ Վ., տ.գ.թ., Չիլի
Դավթյան Ս.Պ., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ք.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Դոկիչ Բ., տ.գ.դ., Բոսնիա և Հերցեգովինա
Զորյան Ե., տ.գ.թ., ԱՄՆ
Իյուշենկո Ա.Ֆ., Բելառուսի ԳԱԱ թղթ. անդամ, տ.գ.դ., պրոֆ., Բելառուս
Լան Չ., տ.գ.թ., Չինաստան
Կարայան Հ.Ս., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Կրասնիկով Գ.Յ., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Կուրտուա Բ., տ.գ.թ., Ֆրանսիա
Հախումյան Ա.Ա., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Հակոբյան Վ.Ն., ֆ.-մ.գ.դ., ՀՀ
Հահանով Վ.Ի., Կիրառական ռադիոէլեկտրոնիկայի Ուկրաինայի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ.,
Ուկրաինա
Ղուլյան Ա.Գ., ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Մանդալիկա Ս., տ.գ.թ., Հնդկաստան
Մարուխյան Ո.Զ., տ.գ.թ., պրոֆ., ՀՀ
Միխայլիչ Ա.Ա., Բելառուսի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., Բելառուս
Շիխտման Ու., տ.գ.թ., Գերմանիա
Չանգ Ֆ., Թայվանի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., Թայվան
Չապլիզին Յու.Ա., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Պետրոսյան Օ.Հ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Պետրոսյանց Կ.Օ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Սապատնեկար Ս., տ.գ.թ., ԱՄՆ
Սարգսյան Յու.Լ., ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Մքիտեն Ս.Ա., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Միմոնյան Ս.Հ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Ստենպլեյսկի Ա.Լ., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Վորոբյով Ա.Ե., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Տիխոմիրով Գ.Վ., ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Ցանովա Ս., տ.գ.թ., Բուլղարիա
Ուբար Ռ., Էստոնիայի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., Էստոնիա
Ուսանով Վ.Ի., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Քուչուկյան Ա.Թ., ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Ответственный секретарь Сейранян Ж.С., Армения

Редколлегия:

Агбалян С.Г., д.т.н., проф., Армения

Акопян В.Н., д.ф.-м.н., Армения

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

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

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

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

Бадалян Н.П., д.т.н., проф., Россия

Воробьев А.Е., д.т.н., проф., Россия

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

Гонейма М., к.т.н., Египет

Гримблат В., к.т.н., Чили

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

Давтян С.П., член-корр. НАН РА, д.х.н., проф., Армения

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

Зорян Е., к.т.н., США

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

Караян Г.С., член-корр. НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Армения

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

Куртуа Б., к.т.н., Франция

Кучукян А.Т., академик НАН РА, д.т.н., проф., Армения

Лан Ч., к.т.н., Китай

Мандалика С., к.т.н., Индия

Марухян В.З., к.т.н., проф., Армения

Михалевич А.А., академик НАН Беларуси, д.т.н., проф., Беларусь

Петросян О.А., д.т.н., проф., Армения

Петросянц К.О., д.т.н., проф., Россия

Сапатнекар С., к.т.н., США

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

Сбитнев С.А., д.т.н., проф., Россия

Симонян С.О., д.т.н., проф., Армения

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

Тихомиров Г.В., д.ф.-м.н., проф., Россия

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

Усанов В.И., д.т.н., проф., Россия

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

Цанова С., к.т.н., Болгария

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

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

Шлихтманн У., к.т.н., Германия

EDITORIAL BOARD

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

Հրատ. խմբագիր՝

Ժ.Ս. ՄԵՅԴԱՆՅԱՆ

Խմբագիրներ՝

Հ.Յ. ՊԵՏԴՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

© Издательство НПУА

Известия НАН РА и НПУА (сер. Техн. наук), 2019

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ
ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

Տ Ե Ղ Ե Կ Ա Գ Ի Ր

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И НАЦИОНАЛЬНОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА АРМЕНИИ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

PROCEEDINGS

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

SERIES OF TECHNICAL SCIENCES

2019

2

ՀԱՏՈՐ

ТОМ 72
VOLUME

ԱՊՐԻԼ – ՀՈՒՆԻՍ
АПРЕЛЬ – ИЮНЬ
APRIL - JUNE

Հրատ. Խմբագիր՝

ԺԱՆՆԱ Ս. ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Խմբագիրներ՝

Հ.Յ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

Ստորագրված է տպագրության՝ 06.06.2019

Թուղթը՝ “օֆսեթ”: Տպագրությունը՝ ռիզո: Ֆորմատ՝ (70×100) 1/16:

Շարվածքը՝ համակարգչային:

Տառատեսակը՝ Sylfaen, Times New Roman: 9.25 տպ. մամ.:
Պատվեր՝ 201: Տպաքանակ՝ 200

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

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

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

А.С. САРГСЯН

**ЭЛЕКТРОУПРУГИЕ СДВИГОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ В СОСТАВНОМ
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ
СЛОЕМ**

Рассматривается задача взаимодействия электрического и механического полей при полном контакте двух пьезоэлектрических полупространств. На разделительной плоскости контакта склеен металлический тонкий слой. Под действием линейного источника установившихся сдвиговых колебаний в составном пространстве распространяются электроупругие волны сдвига. Волновое поле представляется регулярными интегралами на разрезах в комплексной плоскости. Принимаются методы теории функций комплексного переменного и контурного интегрирования. При определенных значениях электроупругих параметров среды распространяются локализованные у контактной плоскости сдвиговые волны.

Ключевые слова: электроупругость, источник возмущений, сдвиговые колебания, поверхностные волны, пьезоэлектрик.

Введение. Исследование распространения сдвиговых волн в конструктивно неоднородных пьезоэлектрических средах актуально с точки зрения современной механики сплошной среды. Особое место в механике твердого тела и в математической физике занимают задачи взаимодействия физико-механических полей в деформируемых системах [1-4]. Изучение процессов распространения колебаний в составной пьезоэлектрической среде тесно связано с развитием прикладной физики и электроупругости и выявляет существенные физико-технические особенности при проектировании акустоэлектрических и измерительных инженерных устройств. В [2] рассмотрена задача линейного источника установившихся колебаний в пьезоэлектрическом пространстве с бесконечным металлическим слоем. В [3] исследована задача дифракции плоской сдвиговой волны в пьезоэлектрическом пространстве при наличии полубесконечного металлического слоя малой толщины. Определяется волновое поле на контактном участке слоя со средой и в пьезоэлектрическом пространстве. В [4] рассмотрена задача о распространении локализованной электроупругой сдвиговой волны в составном пьезоэлектрическом пространстве, когда между электроупругими средами находится тонкий металлический электропроводящий слой. Выявлены условия существования этих волн. Отметим, что эти условия использованы в данной задаче о распространении

сдвиговых колебаний. Исследованию задач дифракции плоской электроупругой волны и локализованной, поверхностной волны на полубесконечной трещине между скрепленными диэлектрическими полупространствами с пьезоэффектом посвящены работы [5,6]. В данной работе рассматривается сдвиговое волновое поле в составной пьезоэлектрической среде, состоящей из двух полупространств, когда в одном из них действует линейный источник установившихся механических колебаний. Выявлены некоторые особенности электроупругого волнового поля, обусловленные наличием пьезоэффекта и тонкого металлического слоя между скрепленными полупространствами.

Постановка задачи. Рассматриваемая электроупругая среда состоит из двух полупространств–пьезоэлектриков класса *6mm* гексагональной симметрии с разными электроупругими характеристиками. Среда занимает пространство, отнесенное к декартовой системе координат $Oxyz$. Главная ось кристалла совпадает с осью Oz . На разделительной плоскости $y=0$ склеен тонкий металлический слой, который можно рассматривать как электрод.

Среда совершает установившиеся колебания под действием линейного источника, действующего в верхнем полупространстве по линии $x=0$, $y=b$:

$P(x, y, t) = P_1 \delta(x) \delta(y-b) e^{-i\omega t}$ (рис.1), где $P_1 = const$ – интенсивность действующей силы; ω – частота колебаний; t – параметр времени; $\delta(x)$ – функция Дирака. Среда находится в условиях антиплоской деформации. Задача заключается в определении сдвигового волнового поля в пьезоэлектрических полупространствах. За основу принимаем дифференциальные уравнения динамической теории упругости и уравнения электродинамики в квазистатическом приближении. Учитывается гармоническая зависимость от времени всех составляющих волнового поля (временной множитель $e^{-i\omega t}$), следовательно, задача решается в амплитудах. Для определения амплитуд перемещения $w_1(x, y)$, $w_2(x, y)$ и электрического потенциала $\Phi_1(x, y)$, $\Phi_2(x, y)$ в соответствующих полупространствах имеем уравнения [1–4]

$$\begin{aligned} c_i \Delta w_i + e_i \Delta \Phi_i + \omega^2 \rho_i w_i &= P \delta(x) \delta(y-b), \\ e_i \Delta w_i - \varepsilon_i \Delta \Phi_i &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

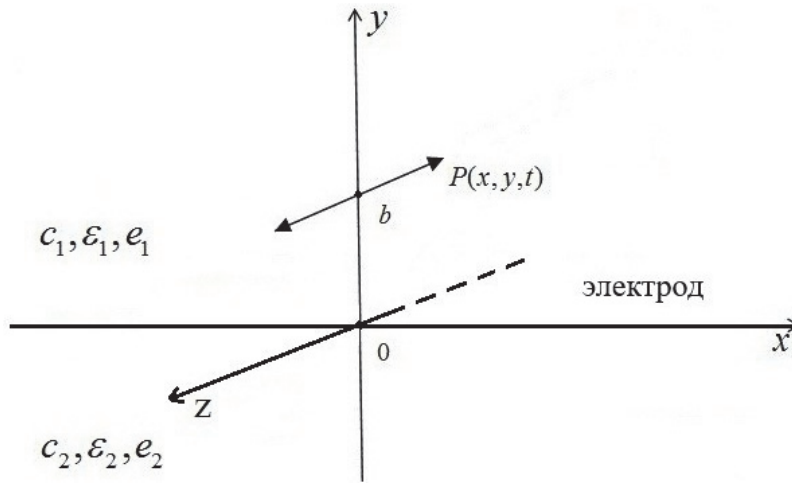


Рис.1

В этих уравнениях $P_2 = 0$, $\varepsilon_i = \varepsilon_{11}^{(i)}$, $e_i = e_{15}^{(i)}$, $c_i = c_{44}^{(i)}$, $i = 1, 2$ – диэлектрические, пьезоэлектрические и упругие постоянные соответствующих пьезоэлектрических полупространств $y > 0$ и $y < 0$, а ρ_i – плотность материалов

этих полупространств, $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$.

Решения уравнений (1) должны удовлетворять следующим условиям на плоскости $y = 0$:

$$\begin{aligned}\Phi_1(x, 0) &= \Phi_2(x, 0) = 0, \\ \sigma_{yz}^{(1)}(x, +0) &= \sigma_{yz}^{(2)}(x, -0), \\ w_1(x, +0) &= w_2(x, -0).\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь $\sigma_{yz}^{(1)}(x, y)$, $\sigma_{yz}^{(2)}(x, y)$ – амплитуды напряжений в соответствующих полупространствах:

$$\sigma_{yz}^{(i)} = c_i \frac{\partial w_i}{\partial y} + e_i \frac{\partial \Phi_i}{\partial y}, \quad i = 1, 2.$$

Решение задачи. Применяя интегральное преобразование Фурье по переменной x к уравнениям (1) и условиям контакта (2), получим уравнения относительно трансформант искоемых функций:

$$\bar{w}_i = \int_{-\infty}^{\infty} w_i(x, y) e^{i\sigma x} dx, \quad \bar{\Phi}_i = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_i(x, y) e^{i\sigma x} dx,$$

$$\begin{aligned}\frac{d^2 \bar{w}_1}{dy^2} - (\sigma^2 - k_1^2) \bar{w}_1 &= Q \delta(y - b), \\ \frac{d^2 \bar{\Phi}_1}{dy^2} - \sigma^2 \bar{\Phi}_1 + k_1^2 \frac{e_1}{\varepsilon_1} \bar{w}_1 &= \frac{e_1}{\varepsilon_1} Q \delta(y - b),\end{aligned}\quad y > 0, \quad (3)$$

$$\begin{aligned}\frac{d^2 \bar{w}_2}{dy^2} - (\sigma^2 - k_2^2) \bar{w}_2 &= 0, \\ \frac{d^2 \bar{\Phi}_2}{dy^2} - \sigma^2 \bar{\Phi}_2 + k_2^2 \frac{e_2}{\varepsilon_2} \bar{w}_2 &= 0,\end{aligned}\quad y < 0 \quad (4)$$

и следующие условия при $y = 0$:

$$c_1 \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial y} + e_1 \frac{\partial \bar{\Phi}_1}{\partial y} = c_2 \frac{\partial \bar{w}_2}{\partial y} + e_2 \frac{\partial \bar{\Phi}_2}{\partial y}, \quad \bar{\Phi}_1 = \bar{\Phi}_2 = 0, \quad \bar{w}_1 - \bar{w}_2 = 0. \quad (5)$$

Здесь $k_i = \omega / C_i$, C_i , $\chi_i = e_i^2 / c_i \varepsilon_i$, $i = 1, 2$ — соответственно волновое число, скорость распространения сдвиговой электроупругой волны и коэффициент электромеханической связи в полупространствах $y > 0$ и $y < 0$:

$$C_i = \sqrt{c_{44}^{(i)} (1 + \chi_i) / \rho_i}, \quad Q = P_1 / c_1 (1 + \chi_1).$$

Трансформанты функций амплитуд перемещения и потенциала электрического поля имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\bar{w}_1(\sigma, y) &= A(\sigma) e^{-\sqrt{\sigma^2 - k_1^2} y} - Q_1(\sigma, y), \\ \bar{\Phi}_1(\sigma, y) &= B(\sigma) e^{-|\sigma| y} + \frac{e_1}{\varepsilon_1} \bar{w}_1,\end{aligned}\quad y > 0, \quad (6)$$

$$\begin{aligned}\bar{w}_2(\sigma, y) &= A(\sigma) e^{\sqrt{\sigma^2 - k_2^2} y}, \\ \bar{\Phi}_2(\sigma, y) &= \frac{e_2 \varepsilon_1}{e_1 \varepsilon_2} B(\sigma) e^{|\sigma| y} + \frac{e_2}{\varepsilon_2} \bar{w}_2,\end{aligned}\quad y < 0, \quad (7)$$

где из-за контактных условий (5) имеем

$$\begin{aligned}A(\sigma) &= -\frac{(1 + \chi_1) Q e^{-\sqrt{\sigma^2 - k_1^2} b}}{K(\sigma)}, \\ B(\sigma) &= -\frac{e_1}{\varepsilon_1} A(\sigma), \\ Q_1(\sigma, y) &= \frac{Q}{2\sqrt{\sigma^2 - k_1^2}} (e^{-\sqrt{\sigma^2 - k_1^2} |y-b|} - e^{-\sqrt{\sigma^2 - k_1^2} (y+b)}).\end{aligned}\quad (8)$$

Характеристическая функция данной задачи имеет вид

$$\begin{aligned} K(\sigma) &= K_1(\sigma) + \frac{c_2}{c_1} K_2(\sigma), \\ K_1(\sigma) &= (1 + \chi_1) \sqrt{\sigma^2 - k_1^2} - \chi_1 |\sigma|, \\ K_2(\sigma) &= (1 + \chi_2) \sqrt{\sigma^2 - k_2^2} - \chi_2 |\sigma|. \end{aligned} \quad (9)$$

Решение задачи (1), представляющее уходящую волну, имеет вид

$$\begin{aligned} w_1(x, y) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(\sigma) e^{-\sqrt{\sigma^2 - k_1^2} y} e^{-i\sigma x} d\sigma - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Q_1(\sigma, y) e^{-i\sigma x} d\sigma, \\ \Phi_1(x, y) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma) e^{-|\sigma| y} e^{-i\sigma x} d\sigma + \frac{e_1}{\varepsilon_1} w_1, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} w_2(x, y) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(\sigma) e^{\sqrt{\sigma^2 - k_2^2} y} e^{-i\sigma x} d\sigma, \\ \Phi_2(x, y) &= \frac{1}{2\pi} \frac{e_2 \varepsilon_1}{e_1 \varepsilon_2} \int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma) e^{|\sigma| y} e^{-i\sigma x} d\sigma + \frac{e_2}{\varepsilon_2} w_2. \end{aligned} \quad (11)$$

Выполняя условия уходящей волны, принимается, что $\sqrt{\sigma^2 - k_i^2} = -i\sqrt{\sigma^2 - k_i^2}$, $i = 1, 2$, $\sqrt{\sigma^2 - k_i^2} \rightarrow |\sigma|$ при $|\sigma| \rightarrow \infty$, т.е. действительная ось комплексной плоскости $\alpha = \sigma + i\tau$ обходит точки ветвления $-k_1, -k_2$ двузначных функций $\gamma_i(\sigma) = \sqrt{\sigma^2 - k_i^2}$ сверху, а k_1, k_2 – снизу [2,3].

В случае частной задачи, когда между пьезоэлектрическими полупространствами отсутствует акустический контакт в плоскости $y=0$, характеристическое уравнение для определения волнового числа поверхностной волны примет вид [1–4,7]

$$(1 + \chi_1) \sqrt{\sigma^2 - k_1^2} - \chi_1 |\sigma| = 0, \quad (12)$$

которое имеет единственный положительный корень:

$$\sigma_1 = k_1 \frac{1 + \chi_1}{\sqrt{1 + 2\chi_1}} > k_1 > 0, \quad (13)$$

т.е. в пьезоэлектрических полупространствах возникают поверхностные сдвиговые электроупругие волны Гуляева–Блюстейна со скоростью $\frac{\omega}{\sigma_1} < C_1$.

Рассмотрим волновое поле в составном пьезоэлектрическом полупространстве $x < 0$. Представим функции амплитуд $w_1(x, y)$, $w_2(x, y)$ в виде интегралов

$$w_1(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A^{(1)}(\sigma) e^{-\sqrt{\sigma^2 - k_1^2} y} e^{-i\sigma x} d\sigma + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B^{(1)}(\sigma) e^{-\sqrt{\sigma^2 - k_1^2} y} e^{-i\sigma x} d\sigma - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Q(\sigma, y) e^{-i\sigma x} d\sigma, \quad (14)$$

$$w_2(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A^{(1)}(\sigma) e^{\sqrt{\sigma^2 - k_1^2} y} e^{-i\sigma x} d\sigma + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B^{(1)}(\sigma) e^{\sqrt{\sigma^2 - k_1^2} y} e^{-i\sigma x} d\sigma, \quad (15)$$

где

$$A^{(1)}(\sigma) = -\frac{(1 + \chi_1) Q e^{-\sqrt{\sigma^2 - k_1^2} b}}{K_0(\sigma)},$$

$$B^{(1)}(\sigma) = -\frac{(1 + \chi_1)(c_1 \chi_1 + c_2 \chi_2) Q (|\sigma| - \sigma)}{c_1 K(\sigma) K_0(\sigma)} e^{-\sqrt{\sigma^2 - k_1^2} b}, \quad (16)$$

$$K_0(\sigma) = (1 + \chi_1) \sqrt{\sigma^2 - k_1^2} - \chi_1 \sigma + \frac{c_2}{c_1} \left((1 + \chi_2) \sqrt{\sigma^2 - k_2^2} - \chi_2 \sigma \right).$$

Функция $K(\sigma)$ имеет нули только в точках $\pm \sigma_0$ [4], σ_0 – единственный положительный корень уравнения $K(\sigma) = 0$ при $\sigma = \sigma_0 > k_2 > k_1 > 0$, если

$$\sqrt{1 - \frac{k_1^2}{k_2^2}} < \frac{\chi_1}{1 + \chi_1} \left(1 + \frac{c_2 \chi_2}{c_1 \chi_1} \right). \quad (17)$$

Преобразуем интегралы (14), (15) методом контурного интегрирования в комплексной плоскости $\alpha = \sigma + i\tau$. Действительная ось обходит как точки ветвления функций $\gamma_i(\sigma) = \sqrt{\sigma^2 - k_i^2}$, так и нули функции $K(\sigma)$, представляющие полюсы соответствующих подынтегральных функций. Обеспечивая условия уходящей волны, действительная ось комплексной плоскости обходит точку $\sigma = -\sigma_0$ сверху, а точку $\sigma = +\sigma_0$ – снизу. Для выбора ветвей двужначных функций $\gamma_1(\alpha)$, $\gamma_2(\alpha)$ следует провести в комплексной плоскости разрезы до бесконечности от точек $\sigma = k_1$, $\sigma = k_2$ в верхней полуплоскости и от точек $\sigma = -k_1$, $\sigma = -k_2$ – в нижней полуплоскости, принимая за основу принцип

уходящей волны [2,3]. Аналитическое продолжение функции $|\sigma|$ в комплексной плоскости представляется в виде $|\alpha| = \alpha$ при $\operatorname{Re} \alpha > 0$ и $|\alpha| = -\alpha$ при $\operatorname{Re} \alpha < 0$. Путь интегрирования замыкается в верхней полуплоскости комплексной плоскости (рис.2) [2,3,5].

Аналитические продолжения подынтегральных функций $A^{(1)}(\sigma)$, $B^{(1)}(\sigma)$ при таких разрезах в комплексной плоскости внутри контура интегрирования имеют единственную особую точку $\sigma = \sigma_0$ – простой полюс $K_*(\sigma_0) = 0$.

Задача симметрична по x , следовательно такие же представления функций амплитуд имеют место и в составном полупространстве $x > 0$. Путь интегрирования замыкается уже в нижней полуплоскости комплексной плоскости. Аналитические продолжения подынтегральных функций внутри контура интегрирования в этом случае имеют единственную особую точку $\sigma = -\sigma_0$.

Существование сдвиговых поверхностных волн в полупространствах обусловлено пьезоэффектом, и наличие источника механических колебаний приводит к распространению этих электроупругих волн. На контактной плоскости раздела амплитуда поверхностной волны принимает максимальное значение.

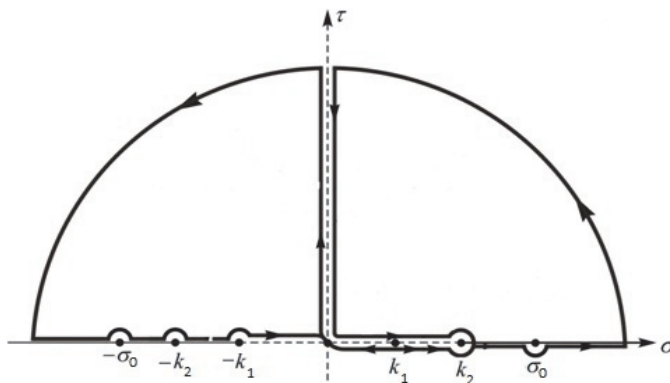


Рис.2

После контурного интегрирования [2,3,8] получим представления функций амплитуд в виде суммы поверхностных волн, если имеет место условие (17), и регулярных интегралов по берегам разрезом, характеризующих объемные затухающие волны. В пространстве появляются обусловленные наличием пьезоэффекта объемные волны, распространяющиеся от контактной поверхности по направлению y и имеющие неволновой характер по x на контактной поверхности.

Функции амплитуд поверхностных волн, распространяющихся в составном полупространстве $x < 0$, имеют вид

$$\begin{aligned} w_{10}(x, y) &= A_0 e^{-\sqrt{\sigma_0^2 - k_1^2} y} e^{-i\sigma_0 x}, & y > 0, \\ w_{20}(x, y) &= A_0 e^{\sqrt{\sigma_0^2 - k_2^2} y} e^{-i\sigma_0 x}, & y < 0, \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$A_0 = \frac{i(1 + \chi_1)Q}{K_0'(\sigma_0)} e^{-\sqrt{\sigma_0^2 - k_1^2} b}, \quad K_0'(\sigma) = \frac{dK(\sigma)}{d\sigma},$$

и в составном полупространстве $x > 0$:

$$\begin{aligned} w_{10}(x, y) &= A_0 e^{-\sqrt{\sigma_0^2 - k_1^2} y} e^{i\sigma_0 x}, & y > 0, \\ w_{20}(x, y) &= A_0 e^{\sqrt{\sigma_0^2 - k_2^2} y} e^{i\sigma_0 x}, & y < 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Асимптотическое представление перемещений на граничной плоскости $y = 0$ при $|x| \rightarrow \infty$ имеет вид

$$w_1(x, 0) = A_0 e^{i\sigma_0 |x|} + e^{ik_1 x} O(|k_1 x|^{-3/2}) + \chi_1 O(|k_1 x|^{-2}). \quad (20)$$

Заключение. Неоднородность среды, пьезоэффект и наличие тонкого металлического электропроводящего слоя приводят к существенным изменениям электроупругого волнового поля. Источник механических колебаний в среде, обладающей пьезоэффектом, приводит к распространению сдвиговой поверхностной волны, локализованной у плоскости полного электромеханического контакта при некоторых определенных значениях электроупругих параметров. Поверхностные электроупругие волны имеют фундаментальное значение в микроэлектронной, акустоэлектрической технике. Результаты рассмотренной задачи о распространении сдвиговых колебаний в составном пьезоэлектрическом пространстве могут быть использованы при изучении прикладных задач о системах обработки информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балакирев М.К., Гилинский И.А. Волны в пьезокристаллах. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение 1982. – 240 с.
2. Григорян Э.Х., Синянян С.С. Задача линейного источника сдвиговых колебаний в пьезоэлектрическом пространстве с бесконечным металлическим слоем //Изв. НАН Армении. Механика. – 2009. – Т.62, №1. – С.40–51.

3. **Григорян Э.Х., Мелкумян А.С.** Дифракция сдвиговой плоской волны в пьезоэлектрическом пространстве на краю полубесконечного металлического слоя // Изв. НАН Армении. Механика. – 2004. – Т.57, №4. – С.43–52.
4. **Аветисян А.С., Маргарян Дж.М.** Электроупругие поверхностные волны сдвига на границе раздела двух пьезоэлектрических полупространств //Изв. НАН Армении. Механика. – 1994. – Т.47, №3–4. – С.31–36.
5. **Григорян Э.Х., Джилавыян С.А., Казарян А.А.** Дифракция сдвиговой плоской волны на полубесконечной трещине в пространстве пьезоэлектрик–диэлектрик //Труды 7-й Межд.конф. “Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред”.– Ереван, 2011. – С.137–143.
6. **Джилавыян С.А., Саргсян А.С.** Дифракция поверхностной волны сдвига на полубесконечной трещине в составном пьезоэлектрическом пространстве // Материалы 5-й Межд.конф. “Актуальные проблемы механики сплошной среды”.– Ереван, 2017. – С.79–80.
7. **Belubekyan M.V., Belubekyan V.M.** Surface waves in piezoactive elastic system of a layer on a semi-space// Proc. of the Yerevan State University. Phys. & Math. Sei. – 2013. – 3. – P. 45–48.
8. **Агаян К.Л., Григорян Э.Х.** О новом методе определения асимптотических формул в задачах дифракции волн //Доклады НАН Армении. – 2010. – Т.110, №3. – С. 261–271.

Ереванский государственный университет. Материал поступил в редакцию 15.02.2019.

Ա.Ս. ՄԱՐԳԱՅԱՆ

ՄԱՀՔԻ ԷԼԵԿՏՐԱՍՏԱՏՎԱԿԱՆ ՏՍՏԱՆՈՒՄՆԵՐԸ ՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ՇԵՐՏՈՎ ՊԻԵԶՈԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԲԱՂԱԴՐՅԱԼ ՏԱՐԱԾՈՒԹՅՈՒՆՈՒՄ

Դիտարկվում է պիեզոէլեկտրական երկու կիսատարածության լրիվ հպման դեպքում էլեկտրական և մեխանիկական դաշտերի փոխազդեցության խնդիրը: Դրանց բաժանման հարթությանը ամրակցված է մետաղական բարակ շերտ: Կայունացված սահքային տատանումների աղբյուրի ազդեցությամբ բաղադրյալ տարածությունում տարածվում են սահքի էլեկտրաառաձգական ալիքներ: Ալիքային դաշտը ներկայացվում է կոմպլեքս հարթությունում ճեղքերի վրա ռեզոլյար ինտեգրալների տեսքով: Կիրառվում են կոմպլեքս փոփոխականի ֆունկցիաների և կոնտուրային ինտեգրման մեթոդներ: Միջավայրի էլեկտրաառաձգական բնութագրիչների որոշակի արժեքների դեպքում տարածվում են հպման հարթության մոտ տեղայնացված սահքի ալիքներ:

Առանցքային բառեր. էլեկտրաառաձգականություն, գրգռումների աղբյուր, սահքային տատանումներ, մակերևութային ալիքներ, պիեզոէլեկտրիկ:

A.S. SARGSYAN

**ELECTROELASTIC SHIFT VIBRATIONS IN COMPOSITE
PIEZOELECTRIC SPACE WITH A METALLIC LAYER**

The problem of interaction of electrical and mechanical fields at the full contact of two piezoelectric half-spaces is considered. On the separation plane of the contact, a metallic thin layer is glued. Under the action of a linear source of the stationary shear vibrations, electroelastic shear waves propagate in the composite space. The wave field is represented by regular integrals on the cuts in the complex plane. The methods of the theory of functions of complex variable and contour integration are admitted. At certain values of the electroelastic parameters of the medium, shear waves localized at the contact plane propagate.

Keywords: electroelasticity, source of disturbances, shear vibrations, surface waves, piezoelectric.

Գ.Ա. ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ, Ա.Հ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Լ.Գ. ԵՂԻԱԶԱՐՅԱՆ,
Ա.Գ. ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ

**ԲԱՐԴ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՈՎ ՀԱՆՔԱՎԱՅՐԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ ԸՆԴՈՂԱԿԱՆ
ՀԱՆՔԱՎԱՅՐԵՐԻ ՆՈՐ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱ՝ ԶԱՆԳՎԱԾԱՅԻՆ ՊԱՅԹԵՑՄԱՄԲ**

Բարդ կառուցվածքով հանքավայրերի մշակումն ուղեկցվում է օգտակար հանածո - դատարկ ապար հալումային սահմանագծում արդյունահանվող հանքաքարի կորուստներով և աղքատացմամբ: Այդպիսի հանքավայրերում նպատակահարմար է իրականացնել հանքաքարի ընտրողական հանույթ, որը պարզ է և համեմատաբար հեշտ իրականացվող: Սակայն բարդ է, երբ մշակվող հանքախորշը չունի միմյանցից սահմանազատված կոնդիցիոն և ոչ կոնդիցիոն հանքաքարի տեղամասեր, ինչը պահանջում է նմուշարկման միջոցով արդյունահանման ենթակա բլոկի կոնդիցիոն տեղամասերի սահմանազատում:

Աշխատանքում առաջարկվում է պայթեցման աշխատանքների կարգավորման նոր տեխնոլոգիա, որը կապահովի միմյանցից զատված լեռնային ապարների փլվածքներ:

Առանցքային բառեր. հորատանցք, հանքաքար, հանքաստիճան, պայթուցիկ նյութ:

Ներածություն: Բարդ երկրաբանական կառուցվածքով հանքաքարային հանքավայրերի մշակումն ուղեկցվում է օգտակար հանածո-դատարկ ապար հալումային սահմանագծում արդյունահանվող հանքաքարի կորուստներով և աղքատացմամբ: Նման հանքավայրերում նպատակահարմար է իրականացնել ընտրողական հանույթ, որն ապահովում է հնարավորինս փոքր կորուստներով և աղքատացմամբ հանքաքարի լիարժեք արդյունահանում: Եթե բարդ հանքախորշում հստակ է օգտակար հանածո-դատարկ ապար սահմանազատումը, ապա հանքաքարի ընտրողական հանույթը պարզ է և համեմատաբար հեշտ իրականացվող [1]: Սակայն խնդիրն այլ է, երբ մշակվող հանքախորշը չունի միմյանցից սահմանազատված կոնդիցիոն և ոչ կոնդիցիոն հանքաքարի տեղամասեր: Այն պահանջում է նմուշարկման միջոցով արդյունահանման ենթակա բլոկի կոնդիցիոն տեղամասերի սահմանազատում:

Ներկայումս քիչ չեն այն հանքավայրերը, որոնք ունեն միմյանցից չսահմանազատված, օգտակար բաղադրիչների համեմատաբար ցածր և բարձր պարունակությամբ հանքաքարի զանգված, և իրականացվում է հանքաքարի համախառն - հանույթ՝ դրանով իսկ փոքրացնելով օգտակար բաղադրիչի պարունակությունը արդյունահանված հանքաքարում, ինչն էլ հանգեցնում է հանքահարստացման արտադրության արդյունավետության նվազմանը: Սա պայմանավորված է կոնդիցիոն տեղամասերի ճիշտ սահմանազատման և հորատապայթեցման աշխատանք-

ների իրականացման դժվարություններով: Մի շարք աշխատանքներում [2-4] բերված են պայթեցված լեռնային զանգվածի նվազագույն տեղափոխման (նվազագույն փլվածքի լայնք ստանալու) հնարավոր լուծումները, որոնցով և հնարավորինս կպահպանվեն պայթեցված լեռնային զանգվածում հանքամարմնի ձևը և սկզբնական դիրքը: Սակայն այս առաջադրված լուծումները չեն կարող կիրառվել այն հանքավայրերում, որոնց կոնդիցիոն տեղամասերը հանքախորշի ազատ մակերևույթի նկատմամբ ունեն տարբեր դասավորություն և պահանջում են ունենալ միմյանցից զատված պայթեցված լեռնային զանգվածի փլվածքներ: Հետևաբար՝ պայթեցման գործունեության կարգավորման նոր մեթոդների կամ եղանակների մշակումը, որը կապահովի միմյանցից զատված պայթեցված լեռնային ապարների փլվածքներ, արդիական խնդիր է:

Խնդրի դրվածքը և հետազոտության մեթոդները: Հանքաքարի նախապատրաստումը հանույթի հիմնականում իրականացվում է պայթեցմամբ, հետևաբար և ընտրողական հանույթը բնութագրվում է պայթեցված լեռնային զանգվածի փլվածքի պարամետրերով ու փլվածքում բարձր և ցածր պարունակությամբ հանքաքարի բաշխվածությամբ: Ուստի զանգվածային պայթեցմամբ հանքաքարի ընտրողական հանույթի նոր տեխնոլոգիայի մշակումը պահանջում է.

- պայթեցման հորատանցքերի կիրառմամբ իրականացնել հանույթի ենթակա բլոկի կոնդիցիոն և ոչ կոնդիցիոն տեղամասերի սահմանազատում,
- յուրաքանչյուր եզրագծված տեղամասի համար ստանալ անհրաժեշտ մանրացվածության ու միմյանցից սահմանազատված կոնդիցիոն և ոչ կոնդիցիոն հանքաքարի պայթեցված փլվածքներ,
- պայթեցումից հետո հանքախորշում ունենալ տրված պարամետրերով պայթեցված լեռնային զանգվածի փլվածք, որը կապահովի ընտրողական հանույթ իրականացնող մեկշերտիանի էքսկավատորի ռիթմիկ աշխատանքը:

Հանույթի ենթակա բլոկի կոնդիցիոն տեղամասի եզրագծումն իրականացվում է հետևյալ սկզբունքով:

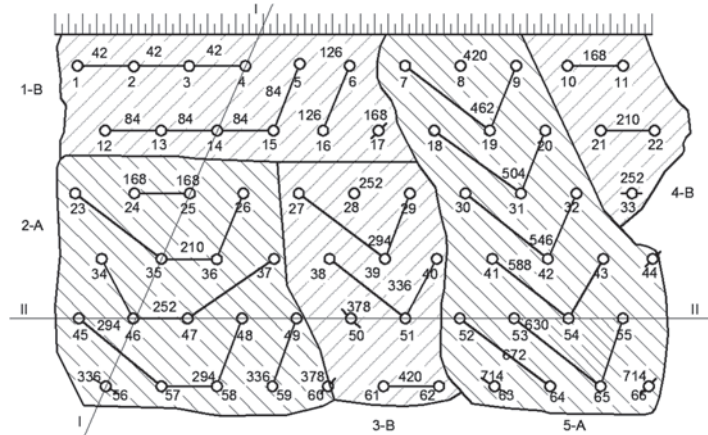
Համաձայն պայթեցման նախագծի՝ ընտրվում է պայթեցման հորատանցքերի ցանցը ($a \times b$), այսինքն՝ հաշվարկվում են հորատապայթեցման պարամետրերը, որոնք հանդիսանում են պայթեցում իրականացնելու համար ելակետային ցուցանիշներ հանքաքարի համախառն հանույթի դեպքում (աղ. 1):

1. Համաձայն նախագծի, պայթեցման ենթակա բլոկում հորատվում են աղ. 1-ում բերված $d_{\text{CK}}=250$ մմ, $a \times b=6,5 \times 6,5$ մ, $l_{\text{CK}}=17,8$ մ, $n_P=6$ հատ և $n_{\text{CK}}=11$ հատ պարամետրերով հորատանցքեր, և կատարվել է բերված պարամետրերի նմուշարկում:

Հորատապայթեցման աշխատանքների պարամետրերը համախառն հանույթի դեպքում

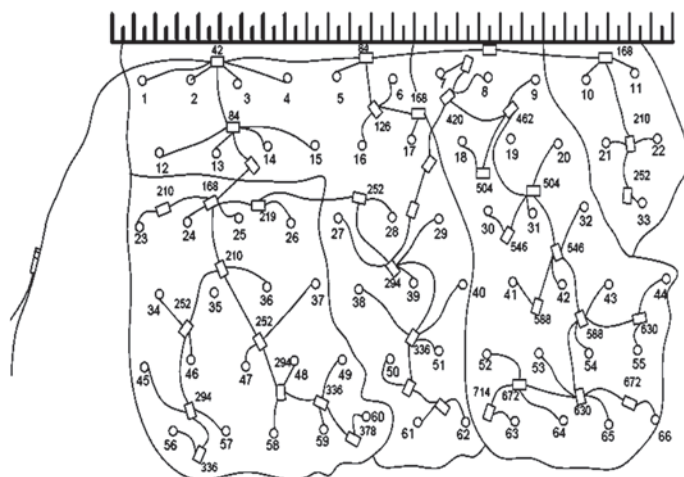
Հ/հ	Պարամետրի կամ ցուցանիշի անվանումը,չափման միավորը	Պարամետրի կամ ցուցանիշի արժեքը	Պարամետրի կամ ցուցանիշի հաշվարկային բանաձևը
Ելակետային			
1	Հանքաստիճանի բարձրությունը(H_y), $մ$	15	-
2	Հորատանցքի տրամագիծը (d_{ck}), $մմ$	250	
3	Հանքաստիճանի թեքման անկյունը (α_y), $աստ.$	80	
4	Հորատանցքերի թեքման անկյունը (α_{ck}), $աստ.$	90	
5	Ապարի ծավալային զանգվածը(γ_n), $տ/մ^3$	2,8	
6	Պայթուցիկ նյութի (ՊՆ) դետոնացման արագությունը (D_{BB}), $մ/վ$	4000	
7	Հորատանցքերի շարքերի թիվը (n_p), $հատ$	6	
8	Հորատանցքերի թիվը շարքում (n_{ck}), $հատ$	11	
9	ՊՆ-ի հաշվարկային տեսակարար ծախսը(q), $կգ/մ^3$	0,61	
10	ՊՆ-ի լիցքի խտությունը (k_{BB}), $գ/սմ^3$	0,8	
11	1 մ հորատանցքում ՊՆ-ի լիցքի տարողությունը (p), $կգ/մ$	40	
Հաշվարկային			
12	Հորատանցքային ցանցը ($a \times b$), $մ$	6,5×6.5	$\begin{aligned} a &= b = \\ &= \frac{28 \times m \times d_{ck} \times f \times k_{BB}}{q \times m} = \\ &= 6.5, \\ f &= \frac{l_{\text{zap}}}{H_y} = 0,8 \end{aligned}$
13	Հորատանցքերի մոտեցման գործակից (m)	0,7...0,9	-
14	Հանքաստիճանի հիմքի դիմադրության գիծը (w), $մ$	8,0	$w = \frac{a}{m}$
15	Գերհորատման չափը (l_{nep}), $մ$	2,8	$l_{\text{nep}} = 0.5 \times q \times w$
16	Հորատանցքի խորությունը (l_{ck}), $մ$	17,8	$l_{ck} = H_y + l_{\text{nep}}$
17	Խցանյութի երկարությունը (l_{3a6}), $մ$	6,0	$l_{\text{3a6}} = 0,75 \times w$
18	ՊՆ-ի լիցքի երկարությունը (l_{zap}), $մ$	11,8	$l_{\text{zap}} = l_{ck} - l_{\text{3a6}}$
19	ՊՆ-ի լիցքի քանակը հորատանցքում (Q_{ck}), $կգ$	472	$Q_{ck} = p \times l_{\text{zap}}$

Յուրաքանչյուր համարակալված հորատանցքի նմուշարկման արդյունքում որոշվել է օգտակար բաղադրիչի պարունակությունը, և իրականացվում է ըստ վերջինիս տեղամասի սահմանագատում (նկ.1):



Նկ.1. Սահմանագատված տեղամասերի անհրաժեշտ պայթեցման սխեմաները.
A-օգտակար բաղադրիչի բարձր պարունակությամբ տեղամասերը, B- օգտակար
բաղադրիչի ցածր պարունակությամբ տեղամասերը

Ստորև նկ. 2-ում ներկայացված է կարճ դանդաղեցմամբ պայթեցման սխեմայի սարման կարգը:



Նկ.2. Կարճ դանդաղեցմամբ պայթեցման սխեմայի սարմունք՝ մակերևութային
(ArmdetHTD) և ներքին հորատանցքային (ArmdetMS) դետոնատորների կիրառմամբ.

1, 2, 3...66- հորատանցքերի համարները,
42, 84, 126...714 – կարճ դանդաղեցված պայթեցման հապաղումները,
1-B , 2-A , 3-B, 4-B, 5-A-պայթեցման հերթականությունը՝ ըստ տեղամասերի

Պայթեցման հանքաքարի ընտրողական հանույթի տեխնոլոգիան պահանջում է կարգավորել պայթեցման էներգիան յուրաքանչյուր սահմանազատված տեղամասի համար, այսինքն՝ այդ տեղամասերում ունենալ անհրաժեշտ պարամետրերով պայթեցված լեռնային զանգված: Սահմանազատված տեղամասերում անհրաժեշտ պարամետրերով պայթեցված ապարների փլվածք ստանալու համար անհրաժեշտ է իրականացնել պայթեցման էներգիան կարգավորող պարամետրերի փոփոխություն:

Տվյալ պարագայում պայթեցման էներգիան կարգավորող պարամետրեր կարող են հանդիսանալ կիրառվող պայթուցիկ նյութի դետոնացման արագությունը, լիցքի կառուցվածքը և պայթեցման սխեմաները:

Պայթեցված լեռնային զանգվածի փլվածքի պարամետրերի կարգավորումը հնարավոր է պայթուցիկ նյութի դետոնացման արագության փոփոխման դեպքում [5]: Դետոնացման արագության փոքրացումը կհանգեցնի լիցքի խոռոչի պատերի վրա զազագոյացման սահմանային ճնշման նվազեցման և կմեծացնի պայթուցիկ նյութի ակտիվ գործունեության տևողությունը, որն իր հերթին կմեծացնի լեռնային զանգվածի մանրացման վրա ծախսվող էներգիան, բնականաբար, նվազեցնելով պայթեցված ապարների տեղափոխման վրա ծախսվող էներգիան:

Պայթուցիկ նյութի դետոնացման արագությունը կարելի է փոքրացնել՝ փոփոխելով նրա խտությունը կամ հորատանցքում լիցքի կառուցվածքը: Այդ իսկ պատճառով սահմանազատված տեղամասերի հպումային հորատանցքերում որպես պայթուցիկ նյութ կիրառելի է Ամոնիտ 6ЖБ-ի և 3...10մմ/տրամագծով, 0,020...0,030 գ/սմ³ խտությամբ հատիկավոր փրփրապոլիստիրոլի (ПП) խառնուրդը:

(1) արտահայտությամբ որոշվում է վերոհիշյալ խառնուրդում բաղադրամասերի ծավալների հարաբերությունը, իսկ աղ. 2-ում բերված են դրանց տեխնիկական բնութագրերը.

$$V_{III+ANFO} = (0,6V_{ANFO} + 0,4V_{III}): \quad (1)$$

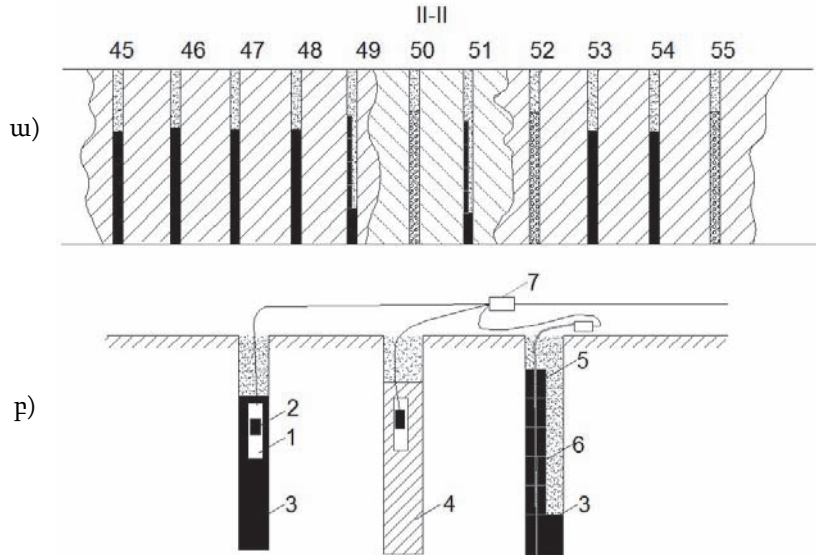
Աղյուսակ 2

Կիրառվող ՊՆ-երի տեխնիկական բնութագրերը

Պայթուցիկ նյութի տիպը	Խտությունը, գ/սմ ³	Դետոնացման արագությունը, մ/վրկ
Ամոնիտ 6ЖБ	0,9	4200
Ամոնիտ 6ЖБ + ПП	0,55	3200
Armex	1,2	5000
ANFO	0,8	4000

Առանձնացված տեղամասերի հպումային մասերում ընտրվում է հորատանցքերի եզրագծային (գծային) լիցքի կառուցվածքը, և օգտագործվում է Ամոնիտ

6ЖБ + ПП խառնուրդը: Հորատանցքերի գծային լիցքավորումն իրականացվում է ANFO-ով և փաթեթավորված Armex (140 x 520մմ/10000գր.) պայթուցիկ նյութի միջոցով՝ միացված դետոնացիոն քուղով (ԺՄ) (նկ. 3):



Նկ. 3. Հանքաքարի բարձր և ցածր հպումային մասերում կիրառվող ՊՆ-ի տիպերը (ա) և ՊՆ-ի լիցքի կառուցվածքը (բ). 1-POWER (հրահրիչ ՊՆ), 2 - MS էլեկտրադետոնատոր, 3 -ANFO, 4 - Ամոնիտ 6ЖБ +ПП խառնուրդ, 5 - ԺՄ դետոնացման քուղ, 6-Armex (140x520մմ 10000)գր 7 - HTD էլեկտրադետոնատոր

Կիրառվող պայթուցիկ նյութերը և լիցքի կառուցվածքը՝ ըստ հորատանցքերի համարների, բերված են աղ. 3-ում:

Աղյուսակ 3

Հորատանցքերում կիրառվող ՊՆ և լիցքի կառուցվածքը

Տեղամասերն ըստ պայթեցման հերթականության	Պայթեցման հապաղումները, մ/վ	Կիրառվող պայթուցիկ նյութերը և լիցքի կառուցվածքը			Պայթեցման սխեմաները
		ANFO	Armex եզրագծային	Ամոնիտ 6ЖБ	
1	2	3	4	5	6
1-B	42	1, 2, 3			շարքերի հաջորդական անկյունագծային պայթեցում
	84	4			
	126	5, 12			
	168	13, 14			
		15	6		
		16	17		

Աղյուսակ 3-ի շարունակությունը

1	2	3	4	5	6
2-A	168			24, 25	սեպաձև ներհատային պայթեցում
	210		26	35, 36	
	252	46, 47	37	23, 34	
	294	48, 57		45	
		58			
	336	59	49	56	
	378		60		
3-B	252	28			սեպաձև ներհատային պայթեցում
	294	39	29	27	
	336		40, 51	38	
	378			50	
	420		62	61	
5-A	420	8			սեպաձև ներհատային պայթեցում
	462	19		7, 9	
	504	31		18, 20	
	546	42		30, 32	
	588	54		41, 43	
	630	53, 65		44, 55	
	672	64		52	
	714			63, 66	
4-B	168	11, 10			շարքերի հաջորդական պայթեցում
	210	22, 21			
	252	33			

Պայթուցիկ նյութի լիցքի երկարության ընտրությունը, կախված կիրառվող պայթուցիկ նյութի տիպից և լիցքի կառուցվածքից, բերված է աղ. 4-ում:

Աղյուսակ 4

ՊՆ-ի լիցքի քանակը հորատանցքում

Ցուցանիշների անվանումը	Պայթուցիկ նյութերի տիպերը		
	ANFO	ANFO+Armex	Ամոնիտ 6ЖВ+ПП
ՊՆ-ի լիցքի երկարությունը, մ	11,8	13,8	13,3
ՊՆ-ի լիցքի քանակը հորատանցքում, կգ	472	164+196	386

Կարճ դանդաղեցմամբ պայթեցման սխեմաների ընտրության ժամանակ անհրաժեշտ է հաշվի առնել հանքախորշի մերկացված մակերևույթի նկատմամբ

պայթեցվող միջավայրի զբաղեցրած դիրքը՝ ձևավորելու համար պահանջվող պարամետրերով փվվածք և ազատ մակերևույթ (աղ. 4):

Պայթեցման հապաղումների տևողությունը որոշվում է (2) բանաձևով [1].

$$t = \frac{\left((a^2 + 4 \times w^2)\right)^{\frac{1}{2}}}{v}, \quad (2)$$

որտեղ v -ն ապարում երկայնական ալիքի տարածման արագությունն է, $v=500$ մ/վ:

Տեղադրելով համապատասխան մեծությունների թվային արժեքները (2) արտահայտության մեջ՝ կստանանք.

$$t = \frac{(6.5^2 + 4 \times 8.0^2)^{1/2}}{500} = 34,6 \text{ մ/վ}, \text{ ընդունվում է } 42 \text{ մ/վ:}$$

Աղ. 5-ում բերված են հորատանցքերի պայթեցման հերթականությունը և միաժամանակ պայթող լիցքերի առավելագույն քանակը:

Աղյուսակ 5

Հորատանցքերի պայթեցման հերթականությունը և միաժամանակ պայթող լիցքերի առավելագույն քանակը

Դանդաղեցումների համարը	Դանդաղեցման ժամանակը, մ/վրկ	Պայթող լիցքերի առավելագույն քանակը	Պայթող հորատանցքերը							Միաժամանակ պայթող լիցքի քանակը, կգ
			1	2	3	4	5	6	7	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	42	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	1	2	3	4				
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	472	472	472	472				1888
2	84	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	5	12	13	14	15			
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	472	472	472	472	472			2360
3	126	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	6	16						
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	360	472						832

Աղյուսակ 5-ի շարունակությունը

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	168	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	10	11	17	24	25			
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	360	472	360	386	386			1964
5	210	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	21	22	23	26	35	36		
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	360	472	386	360	472	386		2436
6	252	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	28	33	34	46	47	37		
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	472	360	386	472	472	360		2496
7	294	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	27	29	45	48	57	58	39	
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	386	360	472	472	472	472	472	3106
8	336	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	38	40	49	51	56	59		
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	386	360	360	360	386	472		2324
9	378	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	50	60						
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	386	360						746
10	420	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	8	61	62					
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	472	386	360					1218
11	462	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	7	9	19					
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	386	386	472					1244
12	504	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	18	20	31					
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	386	386	472					1244
13	546	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	30	32	42					
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	386	386	472					1244
14	588	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	41	43	54					
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	386	386	472					1244
15	630	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	44	53	55	65				
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	386	472	386	472				1716
16	672	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	64	52						
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	472	386						858
17	714	Միաժամանակ պայթող հորատանցքերի համարները	63	66						
		Հորատանցքում լիցքի քանակը, կգ	386	386						772

Հորատապայթեցման պարամետրերը և պայթեցման արդյունքները՝ ըստ կիրառվող պայթուցիկ նյութերի և լիցքի կառուցվածքի, բերված են աղ. 6-ում:

Աղյուսակ 6

Առաջադրված պարամետրերի դեպքում պայթեցման արդյունքները

Ելակետային ցուցանիշ	Առաջադրված ցուցանիշ				
	Կիրառվող պայթուցիկ նյութերը				
	Ամոնիտ 6ЖВ+ПП	ANFO	Armex (140×520 մմ)		
Հանքաստիճանի բարձրությունը, մ	15	15	15		
Հորատանցքի տրամագիծը, մմ	250	250	250		
Հորատանցքի թեքման անկյունը, աստ.	90	90	90		
Ապարի ծավալային զանգվածը, տ/մ³	2,8	2,8	2,8		
ՊՆ-ի դետոնացման արագությունը, մ/վ	3200	4000	5000		
ՊՆ-ի տեսակարար ծախսը, կգ/մ³	0,50	0,61	0,46		
ՊՆ-ի լիցքի խտությունը, գ/սմ³	0,55	0,8	1,2		
ՊՆ-ի լիցքի տարողությունը 1 մ հորատանցքում, կգ/մ	29	40	–		
Հորատանցքային ցանցը, մ6.5 × 6.5	6,5×6,5	6,5×6,5	6,5×6,5		
Հանքաստիճանի հիմքի դիմադրության գիծը, մ	8,0	8,0	8,0		
Հորատանցքի խորությունը, մ	17,8	17,8	17,8		
Խցանյութի երկարությունը, մ	4,5	6,0	4,0		
ՊՆ-ի լիցքի երկարությունը, մ	13,3	11,8	13,8		
ՊՆ-ի լիցքի քանակը հորատանցքում, մ	386	472	360		
Պայթեցված զանգվածի փլվածքի պարամետրերը					
Տեղամասերը	1-B	2-A	3-B	4-B	5-A
Առաջին շարքի պայթեցումից ձևավորված փլվածքի լայնությունը, մ	32,8	19,5	21,7	30,6	23,3
Փլվածքի բարձրությունը, մ	8,4	16,4	17,6	10,2	17,0

Հետազոտության արդյունքները: Նկ.1-ում բերված յուրաքանչյուր առանձնացված տեղամասի համար, կախված ազատ մակերևույթի նկատմամբ վերջիններիս տեղադրման դիրքից, ընտրվել են պայթեցման նոր տեխնոլոգիա և կարճ դանդաղեցմամբ պայթեցման սխեմա: Առաջադրված պարամետրերի և պայթեցման սխեմայի կիրառման դեպքում, համաձայն առաջարկված պայթեցված լեռնային ապարների տեղափոխման և փլվածքի ձևավորման հետազոտման մեթոդիկայի [5], որոշվել են.

- առանձին տեղամասերի պայթեցումից ստացված փլվածքների ձևը (նկ.4) և պարամետրերը (արտանետմամբ տեղափոխված տեղամասի լայնությունը և բարձրությունը),

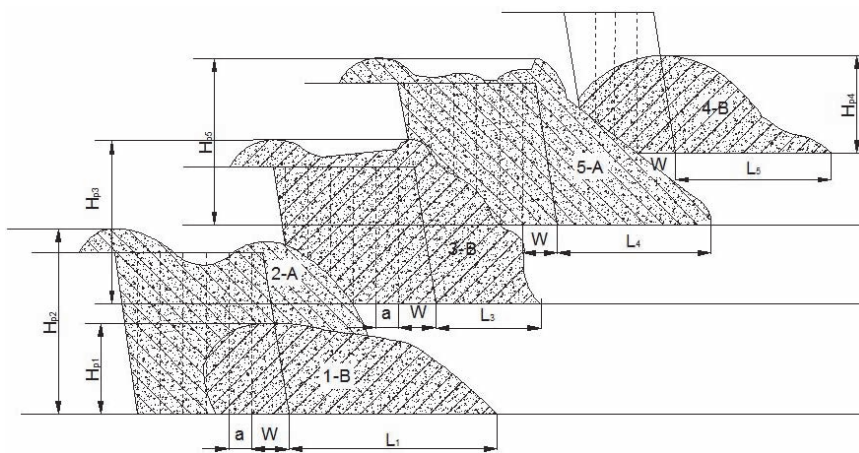
- պայթեցումից հետո օգտակար բաղադրիչի բարձր և ցածր պարունակությամբ հանքաքարի դասավորությունը փլվածքում (նկ. 5)

- տեղաբաշխված օգտակար բաղադրիչի բարձր և ցածր պարունակությամբ հանքաքարի փլվածքների պարամետրերը (աղ. 6):

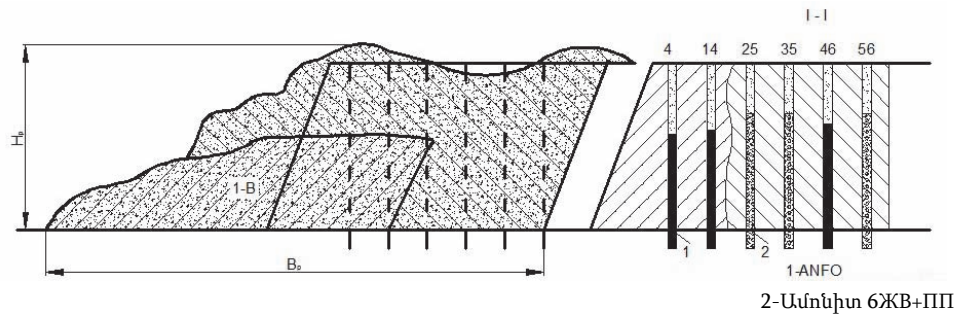
Հարկ է նշել, որ հանության աշխատանքները պետք է կատարվեն ըստ հանքաքարի առանձնացված փլվածքների (նկ. 6), այսինքն՝ հանութաբարձող և տեղափոխող սարքավորումները պետք է տեղադրվեն փլվածքի վրա, և բարձրագույն տեղափոխման աշխատանքները պետք է կատարվեն փլվածքների միմյանց գուգահեռ ընթացքներով՝ պահպանելով (3) արտահայտությամբ ներկայացված պայմանը.

$$L_1 - L_2 = T + Z + C, \quad (3)$$

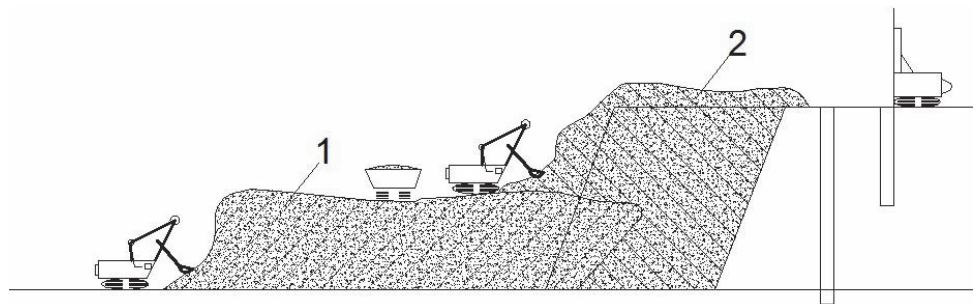
որտեղ L_1 -ը արտանետմամբ տեղափոխված փլվածքի լայնքն է 1-B տեղամասի պայթեցման դեպքում, L_2 -ը՝ արտանետմամբ տեղափոխված փլվածքի լայնքը 2-A տեղամասի պայթեցման դեպքում, T -ն՝ տրանսպորտային գոտու լայնքը, Z -ն՝ փլվածքի և տրանսպորտային գոտու միջև տարածությունը, C -ն՝ անվտանգության բերման՝ $L_1 - L_2 = 7,5 + 2,8 + 3,0 = 13,3$ մ:



Նկ. 4. Առանձին տեղամասերի պայթեցումից ստացված փլվածքները



Նկ. 5. Պայթեցված բլոկի առանձնացված տեղամասերի փլվածքի ձևը և տեղաբաշխումը փլվածքում



Նկ. 6. Պայթեցված հանքաքարի զանգվածի բարձրան և տեղափոխման տեխնոլոգիական սխեման՝ ըստ առանձնացված փլվածքների

Եզրակացություն: Պայթեցման գործունեության կարգավորման նոր տեխնոլոգիան թույլ է տալիս.

1. Զանգվածային պայթեցմամբ ստանալ անհրաժեշտ մանրացվածությամբ և միմյանցից սահմանազատված կոնդիցիոն և ոչ կոնդիցիոն հանքաքարի տրված պարամետրերով պայթեցված փլվածքներ, որն էլ բարձրացնում է հանքահարստացման արտադրության արդյունավետությունը:

2. Փոքրացնել պայթուցիկ նյութի տեսակարար ծախսը դժվարապայթելի ապարների դեպքում՝ 10...20%, հեշտ և միջին պայթելիությամբ ապարների դեպքում՝ 20...30%:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Анистратов Ю.И.** Технология открытой добычи руд редких и радиоактивных металлов. - М.: Недра, 1988. - 430 с.
2. **Баранов Е.Г., Тангаев И.А.** Опыт селективной разработки сложных месторождений. - Фрунзе: Илим, 1969. - 188 с.

3. Юматов Б.П., Байков Б.Н., Смирнов В.П. Открытая разработка сложноструктурных месторождений цветных металлов. - М.: Недра, 1973. – 394 с.
4. Богачев А.Ф., Салманов О.И., Вовкотруб Н.Н. Прогнозирование ширины развала взорванной массы в карьерах // Межвуз. сб. науч. трудов Магнитогорского горнометаллургического института.-1974.- Вып. 4. -С. 19-27.
5. Агаронян Г.А., Агаронян А.Г. Моделирование процесса перемещения и формирования развала взорванной горной массы при взрыве в трещиноватой среде// Вестник Национального политехнического университета Армении: Metallurgy, materials science, non-ferrous metallurgy. - Ереван, 2018.– N. 1. - С. 84-95.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 10.04.2019:

Г.А. АГАРОНЯН, А.Г. ОГАНЕСЯН, Л.Г. ЕГИАЗАРЯН, А.Г. АГАРОНЯН

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СЕЛЕКТИВНОЙ РАЗРАБОТКИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МАССОВЫМ ВЗРЫВОМ

Разработка сложноструктурных месторождений сопровождается потерями и разубоживанием добываемой руды на контактной линии (границе) полезного ископаемого и пустой породы. В подобных месторождениях целесообразнее осуществлять селективную выемку. Однако в сложных забоях вследствие отсутствия границы между полезным ископаемым и пустой породой разработка потребует разделения кондиционных участков блока, подлежащих добыче, посредством опробования геологических скважин.

В работе предлагается новая технология проведения взрывных работ, которая обеспечит развалы взорванной горной массы, отделенные друг от друга.

Ключевые слова: скважина, руда, уступ, взрывчатое вещество.

**G.A. AHARONYAN, A.H. HOVHANNISYAN, L.G. YEGHIAZARYAN,
A.G. AHARONYAN**

A NEW TECHNOLOGY FOR SELECTIVE DEVELOPMENT OF COMPLEX- STRUCTURE DEPOSITS BY MASS EXPLOSION

The development of complex-structure deposits is accompanied by losses and dilution of the mined ore at the contact line (boundary) of the mineral and waste rock. In such deposits, it is more expedient to carry out selective excavation. However, in complex mines, due to the absence of a boundary between the mineral and the waste rock, development will require to limit the conditional sections of the block to be mined by testing the the geological wells.

The paper proposes a new technology and a short control scheme for blasting operations, which will ensure the collapse of rocks separated from each other.

Keywords: hole, ore, ledge, explosive.

Ռ.Զ. ՀԱԿՈԲՅԱՆ

ԵՐԿՐԱԲԱՆԱՀԵՏԱԽՈՒԶԱԿԱՆ ՀՈՐԱՏԱՆՑՔԵՐԻ ՀՈՐԱՏՄԱՆ ՈՐԱԿԻ
ՉԱՓԱՆԻՇՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Բացահայտվում են հորատման որակի գնահատման առավել ընդհանուր և հիմնական սկզբունքները: Ելակետային թեզ է ընդունվել այն, որ հորատման տեխնոլոգիական գործընթացի որակը կարելի է որոշել որպես այդ գործընթացի համապատասխանության չափ հորատման աշխատանքների նպատակի համար: Ուսումնասիրվել են երկրաբանական օբյեկտների տեղեկատվական ծավալների քանակական բնութագրերը, որոնք հիմք են հանդիսացել՝ առաջարկելու կոնկրետ երկրաբանական կառուցվածքների հետախուզական հատումների տեղեկատվական մաթեմատիկական մոդել, որը հաշվի է առնում երկրաբանական օբյեկտների ուսումնասիրվածության աստիճանը, դրանց կառուցվածքի բարդությունը և երկրաբանական հետազոտությունների նպատակը:

Առանցքային բառեր. երկրաբանական օբյեկտ, հորատում, տեղեկության քանակական չափ, տեղեկաքանակ, հորատանցք, հորատահանուկ, տեխնիկա, տեխնոլոգիա, ուղղորդված հորատում:

Ներածություն: Երկրաբանահետախուզական աշխատանքների արդյունավետության և օգտավետության էական բարձրացման համար անհրաժեշտ է բարելավել հորատանցքերի հորատման որակը: Այդ նպատակի իրագործման համար սկզբից պետք է հստակեցնել հետախուզական հորատման որակ հասկացությունը: Ընդ որում, հաճախ հորատման գործընթացի տարբեր բաղկացուցիչ մասերի և տարրերի (հորատանցքի փողի ուղղության կառավարում, հորատահանուկի ստացում և նմուշարկում, լվացում, հորատախորշի ապարների քայքայում և հորատանցքի առաջանցում, հորատանցքի փողի ամրակապում և այլն) հորատման որակի վրա ունեցած ազդեցությունների վերլուծության ժամանակ հաշվի չեն առնվում դրանց փոխկապակցվածությունները, ենթակայությունները և հաջորդականությունները:

Հորատանցքի հորատման որակի առավել ընդհանուր և հիմնական սկզբունքների գնահատման համար որպես նախնական պայման պետք է ընդունել, որ հորատման տեխնոլոգիական գործընթացի որակը կարելի է որոշել որպես տվյալ գործընթացի համապատասխանություն հորատման աշխատանքների որակին [1]:

Ինչպես հայտնի է, հետախուզական հորատման նպատակն է ստանալ տեղեկություն հետազոտվող օբյեկտի երկրաբանական կառուցվածքի մասին: Ընդ որում, հորատման արդյունքում ստացված տեղեկատվությունը կախված է ինչպես երկրաբանական օբյեկտից (կառուցվածքի բարդությունից, այս կամ այն

երկրաբանական առանձնահատկությունների առկայությունից կամ բացակայությունից), այնպես էլ կիրառվող հորատման տեխնոլոգիայից և տեխնիկական միջոցներից: Այստեղից հետևում է, որ հետախուզական հորատման որակը որոշվում է որպես հետախուզվող երկրաբանական օբյեկտի տեղեկատվական բնութագրերի համապատասխանության չափանիշ հորատման տեխնոլոգիական բնութագրերի և տեխնիկական միջոցների տեղեկատվական բնութագրերի միջև: Ընդհանուր առմամբ, կարելի է նշել, որ հորատման տեխնոլոգիայի և տեխնիկական միջոցների տեղեկատվական բնութագրերը պետք է ապահովեն երկրաբանական տեղեկատվության նյութական կրիչների (այս կամ այն ներկայացուցչականության - հորատահանուկի ստացման, հորատահանուկի փողի ուղղության պահպանման և երկրաֆիզիկական ետազոտությունների իրականացման հնարավորության) ապահովումը, ինչպես նաև չափումների իրագործում (հանուկաչափում, կարտաժ, թեքաչափում և այլն) այնպիսի ծավալով, որը կհամապատասխանի տվյալ օբյեկտի տեղեկատվական ծավալին: Ընդ որում, տեխնիկական միջոցների տեղեկատվական բնութագրերի գերազանցումը երկրաբանական նման օբյեկտի բնութագրերից հանգեցնում է աշխատանքների թանկացմանը՝ առանց որակի բարելավման, իսկ այդ բնութագրերի անբավարարությունը՝ տեղեկության անդառնալի կորստին և հորատման որակի նվազմանը:

Տեղեկության բացարձակ քանակի որոշման ժամանակ գոյություն ունեն առայժմ անհաղթահարելի մեթոդական դժվարություններ՝ պայմանավորված բավարար աստիճանի մշակված տեսության բացակայությամբ, ինչի առկայությունը թույլ կտար հաշվի առնել տեղեկության իմաստն ու արժեքը [2]: Տեղեկության միավորները տարբեր են իրենց իմացաբանական ու արժեքային բնութագրերով ու տարբեր ազդեցություններ ունեն վերջնական արդյունքների վրա, հետևաբար և մեխանիկորեն չեն կարող հավասարեցվել:

Հիմք ընդունելով վերոգրյալը՝ ենթադրաբար կարելի է որոշել հարաբերական տեղեկության բնութագրերը, այսինքն՝ ենթադրվում է ըստ իմաստի և արժեքի համադրել միասնական (համասեռ) տեղեկությունները՝ հավասարեցնելով առանձին բաղադրիչները փորձագիտական գնահատման եղանակով, հաշվի առնելով տվյալ տեսակի տեղեկության կարևորությունը:

Տեղեկության քանակական չափը որոշենք որպես անորոշ իրադրության մեջ նպատակին հասնելու վիճակագրական հավանականության բարձրացում [3]՝

$$I = \log_2 \frac{N_1}{N_2}, \quad (1)$$

որտեղ I -ն տեղեկության քանակական չափն է երկուական միավորներով, N_1 և N_2 -ը՝ հավասար հավանական ելքերի քանակը տեղեկության ստացումից առաջ և հետո (մեկ նպաստավոր ելքի առկայության դեպքում):

Այսպիսով, տեղեկության ծավալը կախված է հանքավայրի ուսումնասիրվածության աստիճանից, որն արտահայտվում է N_1 երկընտրանքային ելքային

թվով, ինչպես նաև հետազոտման պահանջվող ճշտությամբ $N_2: N_1$ երկընտրանքային ելքային թիվը կարելի է ներկայացնել որպես հետախուզական հատումների (հորատանցքեր, հետախուզահորեր, հորաններ և այլն) կառուցվածքային հիպոթեզների այբուբեն, ըստ տեղեկության յուրաքանչյուր բաղադրիչի՝ երկրաբանական կառուցվածքի տարածական կողմնորոշման հնարավոր տարբերակները, ապարների միներալաքարագիտական կազմը, հանքաքարի տեսակը և այլն: Հետազոտության ճշտությունը N_2 կարող է արտահայտվել տեղեկության բովանդակային բազմազանության միավորներով, այսինքն՝ բովանդակային այնպիսի տարրական փոփոխություններով, որոնք տարբերվում են պրակտիկ օգտագործման ժամանակ:

Օբյեկտի հետազոտման արդյունքում տեղեկության աճը կարելի է որոշել հետևյալ պայմանական ենթադրության հիման վրա. տեղեկության բովանդակության փոփոխության անորոշությունն ունի նույն տեղեկությունը, ինչ որ նախնական (եվակետային) անորոշությունը N_1 [3]: Այսպիսով՝

$$\Delta I_i = \log_2 \frac{\Delta X_i}{N_{2i}}, \quad (2)$$

որտեղ ΔI_i -ն տեղեկության բացարձակ աճն է ըստ i բաղադրիչի, ΔX_i -ն՝ տեղեկության պարունակության փոփոխությունը i -րդ բաղադրիչի ունեցածի նկատմամբ:

Տարբեր բաղադրիչների համար ΔX մեծության որոշումն ունի առանձնահատկություններ: Հետախուզական կտրվածքների տեղեկատվության կառուցվածքում կարելի է առանձնացնել երեք բաղադրիչներ. **1. սանդղակային** (ռանգավորված)՝ այսպիսի ազդանշանային բաղադրիչի յուրաքանչյուր արժեք կարելի է ներկայացնել որոշակի մեծությամբ և համապատասխան այլ արժեքների հետ որոշակի սանդղակի սահմաններում (օրինակ, կառուցվածքների անկման անկյունների ազիմուտների մեծությունները), **2. սպեկտրային**՝ ազդանշանային բաղադրիչների արժեքները փոփոխվում են խիստ հաջորդաբար (օրինակ, քարադինամիկական շարքի առկայություն նստվածքագոյացման ժամանակ), **3. անկախ**՝ ազդանշանային բաղադրիչի յուրաքանչյուր արժեք կապված չէ այլ արժեքների հետ: Հետևաբար՝ ΔX արժեքների տարբերությունը՝ որպես տեղեկություն կառուցվածքի տարբեր բաղադրիչների վերաբերյալ, կորոշվի տարբեր ձևերով՝ ռանգավորվածների համար՝ բացարձակ արժեքների տարբերությամբ (ազիմուտը՝ $\Delta \alpha = \alpha_2 - \alpha_1$), սպեկտրայինի համար՝ սպեկտրի խախտման աստիճանով, կամ ազդանշանի տեսական և փաստացի արժեքների անհամապատասխանությամբ: Ահայտ բաղադրիչների դեպքում որոշվում է եվակետային (սկզբնական) անորոշության աստիճանով:

Տեղեկատվական կառուցվածքի մոդելի ձևավորման երրորդ պայմանը՝ տեղեկության քանակի կախվածությունն է երկրաբանական հետազոտման նպատակի

բնույթից և կարող է լուծվել այժմեականության փորձարարական գործակցի k ներմուծման միջոցով: Բացահայտված է, որ երբ $\sum_{i=1}^m k_i=1$, նշանակում է, որ տեղեկությունն ունի այնպիսի համալիր արժեք, որն իր համընդհանրությամբ ամբողջությամբ ապահովում է խնդրի լուծումը: k գործակցի միջոցով փորձագիտական գնահատման եղանակով կարող են հաստատվել կառուցվածքի հետախուզական հատումների բաղադրիչների տեղեկատվական քանակը m և արժեքները:

Այսպիսով, հետախուզական հատումների տեղեկատվական կառուցվածքի մաթեմատիկական մոդելը [3], հաշվի առնելով երկրաբանական օբյեկտների ուսումնասիրվածության աստիճանը, դրանց կառուցվածքի բարդությունը և երկրաբանական հետազոտությունների նպատակը (k), կարելի է ներկայացնել հետևյալ ձևով՝

$$I_{\Sigma} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^m \left(k_i \log_2 \frac{N_{1i}}{N_{2i}} + k_i \log_2 \frac{\Delta X_i}{N_{2i}} + \dots + k_i \log_2 \frac{\Delta k_{ni}}{N_{2i}} \right), \quad (3)$$

որտեղ I_{Σ} -ը հետախուզական հատումներով հաջորդաբար ձևավորվող տեղեկության քանակն է, M -ը՝ սկզբնական անորոշության տարբեր արժեքներ ունեցող հատվածների քանակը, n -ը՝ յուրաքանչյուր հատվածում պարամետրերի հաջորդաբար հատումների քանակը, m -ը՝ կառուցվածքի հետախուզական հատումների տեղեկատվական բաղադրիչների քանակը:

Հորատման որակի չափանիշի որոշման համար անհրաժեշտ է սահմանել տարբեր տեսակի տեղեկությունների ծավալի քանակական բնութագրեր տարբեր տեսակի օգտակար հանածոների հանքավայրերի վերաբերյալ.

1) տարբեր տեսակի օգտակար հանածոների հանքավայրերում որոնողահետախուզական աշխատանքների տարբեր փուլերի ելակետային քանակական բնութագրերը,

2) օբյեկտների երկրաբանական հետազոտությունների լրացուցիչ աշխատանքային ծախսերի համապատասխանությունը և տեխնիկական միջոցները,

3) լեռնատեխնիկական պայմանների տեսակը, բնույթը և տեխնիկական միջոցների համապատասխանության աստիճանը այդ պայմաններին:

Երկրաբանական օբյեկտների տեղեկատվության ծավալի քանակական բնութագրերի (այսինքն՝ օբյեկտի այն բնութագրերի որոշման ժամանակ, որոնց ուսումնասիրումը էականորեն կախված է տեխնիկական միջոցներից ու կիրառման եղանակից և ազդում է աշխատանքների կատարման վերջնարդյունքների վրա)՝ որպես հետախուզական հատումների տեղեկատվական բաղադրիչ կարող են հանդես գալ ապարների միներալաբանական բնութագրերը, երկրաբանական կառուցվածքների տարածական կողմնորոշման պարամետրերը, հանքաքարի և շրջափակող ապարների տեխնոլոգիական բնութագրերը և այլն, իսկ հիդրոերկրաբանական հետազոտությունների ժամանակ՝ ջրերի ներհոսքի քանակական և որակական բնութագրերը տարբեր մակարդակներում: Յուրաքանչյուր բաղադ-

րիչի սպասվող տեղեկությունը որոշվում է ելակետային անորոշությունից, ցուցանիշների փոփոխականությունից և հատուկ մեթոդով հետազոտման ճշտության անհրաժեշտությունից:

Կիրառվող տեխնիկական միջոցների և համապատասխան տեխնոլոգիայի միջոցով ստացված տեղեկաքանակի որոշման ժամանակ կարող են դիտարկվել տարբեր ցուցանիշներ.

- երկրաբանական կտրվածքի ամբողջական արտացոլումը (նկատի են առնվում բաց թողնված շերտերը, ենթաշերտերը, գոտիները և այլն), մակերևութ բարձրացված նմուշի (հանուկի) բավարար ծավալը, որը կբավարարի դրա ուսումնասիրման բոլոր պահանջներին, ստացված հանուկի ֆիզիկամեխանիկական վիճակը և հետազոտման համար դրանում առկա բնական կազմի և բաղադրիչների բավարար ծավալը,

- օգտակար հանածոյի նմուշը վերցնելու (նմուշարկելու) ճշտությունը տարածության մեջ (նկատի է առնվում նմուշի փաստացի կոորդինատների համապատասխանության աստիճանը բնական գոյացումների դիտարկվող կոորդինատներին հորատանցքի առաջանցման ժամանակ և իր հերթին՝ այդ դիտարկվող կոորդինատների համապատասխանությունը նախագծային մեծություններին),

- շերտերի, գոտիների, հպատեղերի, խախտումների և այլնի տարածական դիրքի ճիշտ արտացոլումը (տարածման և անկման անկյունները),

- հորատանցքի հորատված տեղամասի փողի վիճակը, որը թույլ կտա ամբողջ ծավալով իրագործել նախագծով նախատեսված երկրաֆիզիկական և հիդրոերկրաբանական հետազոտությունները, տամպոնաժային աշխատանքները և այլն,

- ընդերքի ենթահորատանցքային (ենթափողային) տարածության բնական վիճակի փոփոխության աստիճանը՝ պայմանավորված հորատման աշխատանքներով (նկատի ունենք ստորգետնյա ջրերի տարբեր հորիզոնների բնական մեկուսացման վերականգնման հնարավորությունը, հորատանցք մղվող լվացող հեղուկներով, լուծույթներով, տամպոնաժային խառնուրդներով և այլ մեխանիկական, միներալային, քիմիական, օրգանական նյութերի և միացությունների ազդեցությունը ենթահորատանցքային տարածության վրա):

Տեխնիկական միջոցների տեղեկատվական բնութագրերի գնահատումը կարող է իրագործվել դրանց անձնագրային տվյալների հիման վրա: Ընդ որում, տեխնոլոգիայի և տեխնիկական միջոցների տեղեկաքանակը (ինֆորմատիվությունը) որոշվում է ըստ յուրաքանչյուր բաղադրիչի առանձին՝ համաձայն (1) բանաձևի, իսկ ընդհանուրը՝ (3) բանաձևով: Տեղեկաքանակի հաշվարկման մեթոդը կախված է ΔX մեծության հաշվարկման եղանակից: ΔX կարելի է ստորաբաժանել **սանդղակայինի** (ΔX համապատասխանում է չափիչ սարքի ճշտությանը), **սպեկտրայինի** (ΔX կախված է հպատեղերի խորության չափման ճշտությունից, ազդանշանների

ֆազերի հերթականության և տևողության պահպանումից) և **անկախի** (ΔX կախված է նմուշարկման եղանակից):

Եզրակացություն: Երկրաբանահետախուզական հորատանցքերի հորատման որակի չափանիշը կարելի է արտահայտել համապատասխան գործակցով՝

$$K_h = \frac{J_{op}}{J_m},$$

որտեղ J_{op} –ը օբյեկտի տեղեկատվական ծավալն է, J_m – ն՝ տեխնիկայի և տեխնոլոգիայի տեղեկաքանակը:

K_h մեծության որոշումը համապատասխանում է որակի որոշակի աստիճանավորման: Առաջարկվող մեթոդը կարող է օգտագործվել նախագծային, գիտահետազոտական և փորձարարական կոնստրուկտորական աշխատանքներում՝ գնահատելու հորատման եղանակների և միջոցների տեխնիկական հնարավորությունները տարբեր պայմաններում:

Հորատման որակի բարելավման ընդհանուր սխեմայի գնահատումը, օրինակ, ուղղորդված հորատման կիրառման դեպքում կարելի է ներկայացնել հետևյալ կերպ.

1. Որոշել երկրաբանական օբյեկտի պայմանական տեղեկաքանակը: Վերջին հաշվով տվյալ վերլուծության արդյունքը հորատանցքի հետագծի թույլատրելի շեղման սահմանների որոշումն է, այսինքն՝ շեղման այն չափը, որն էական ազդեցություն չի ունենա երկրաբանական արդյունքի վրա:

2. Որոշել ուղղորդված հորատման տեխնիկական միջոցների և տեխնոլոգիայի տեղեկատվական բնութագրերը: Ուղղորդված հորատման համար, հավանաբար, այդպիսի բնութագիր կհամարվի մեկ միավոր առաջանցման դեպքում հորատանցքի հետագծի ինքնուրույն շեղման բնույթը:

3. Ուղղորդված հորատման տեխնոլոգիայի և տեխնիկական միջոցների ընտրության համապատասխանության գործակցի և օպտիմալության գնահատման որոշումը:

4. Ուղղորդված հորատման տեխնոլոգիայի և տեխնիկական միջոցների կիրառման հետևանքով որակի բարելավման վրա կատարված ծախսերի գնահատումը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Калыгин Е.В., Шабалин В.В.** Вариационный подход к задаче управления режимами алмазного бурения // В кн.: Совершенствование технологии и техники бурения скважин на твердые полезные ископаемые: Межвуз. науч. темат. сборник - Свердловск, 1984. - Вып. 7. - С. 9-13.

2. **Комраков В.В.** Геометризация массива горных пород Естюнинского месторождения по физико-механическим свойствам с целью оптимизации процесса бурения // В кн.: Совершенствование технологии и техники бурения скважин на твердые полезные ископаемые: Межвуз. науч. темат. сборник - Свердловск, 1991.- Вып. 3. - С. 7-13.
3. Математические методы и модели исследования операций: Учебник для вузов / **В.А. Колемаев, В.И. Соловьев, Т.М. Гатауллин** и др.; Под ред. В.А. Колемаева. - М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2008.-592 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 10.04.2019:

Р.З. АКОПЯН

СПОСОБ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА БУРЕНИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН

Данная работа посвящена выяснению наиболее общих и основных принципов оценки качества бурения. Исходным принят тезис о том, что качество технологического процесса бурения можно определить как меру соответствия этого процесса цели буровых работ. Исследованы количественные характеристики информационной емкости геологических объектов и предлагается математическая модель информационной структуры разведочного пересечения с учетом степени изученности геологических объектов, сложности их строения и цели геологических исследований.

Ключевые слова: геологический объект, бурение, количественная мера информации, информативность, скважина, керн, техника, технология, направленное бурение.

R.Z. HAKOBYAN

THE QUALITY CRITERION OF DRILLING GEOLOGICAL- EXPLORATION WELLS

This paper is devoted to clarifying the most common and basic principles for assessing the quality of drilling. The thesis that the quality of the drilling process can be defined as a measure for the compliance of this process with the purpose of drilling operations is adopted as the initial one. The quantitative characteristics of the information capacity of geological objects are investigated, and a mathematical model of the information structure of an exploratory intersection is proposed, taking into account the degree of knowledge of geological objects, the complexity of their structure and the purpose of geological studies.

Keywords: geological object, drilling, quantitative measure of information, informativity, well, core, equipment, technology, directional drilling.

Ս.Գ. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ա.Ա.ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ԱՄԽԱՄՆԱՅԻՆ ԽՏԱՆՑՈՒԹՈՒՄ ՊԱՐՈՒՆԱԿՎՈՂ ԱԶՆԻՎ ՄԵՏԱՂՆԵՐԻ
ԱՂԱՅԻՆ ՔԼՈՐԱՑՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ԿՈՐԶՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ցույց է տրվել, որ ածխածնային խտանյութի՝ NaCl ազդանյութով (մոտ 800°C) քլորացման գործընթացում և արդյունքում գոյացած եռակավածքի մշակմամբ ստացված արգասիքները բովազտելիս ($920\dots 960^{\circ}\text{C}$) տեղի են ունենում ազնիվ մետաղների կորուստներ: Այդ անցանկալի երևույթները կարելի է կանխել ածխածնային խտանյութը նախապես թրծելու (մինչև 600°C), քիմիական թթուներով տարրալուծելու ու ստացված արգասիքները NaCl-ի հիմքով դյուրահալ աղային խառնուրդով միահալելու ($450\dots 560^{\circ}\text{C}$) ճանապարհով: Բացահայտվել է նաև, որ քլորացման գործընթացից անջատված սիլիկահողային նստվածքից ազնիվ մետաղները կորզելու համար նպատակահարմար է կիրառել թթուներով տարրալուծման հիդրոմետալուրգիական եղանակը, քանի որ հնարավորություն է ընձեռում վերականգնել հումքում պարունակվող ոսկու ու արծաթի լիարժեք և պլատինային մետաղների մոտ 80% կորզում:

Առանցքային բառեր. ածխածնային խտանյութ, աղային քլորացում, եռակավածք, ազնիվ մետաղների արգասիքներ, պլատինային խմբի մետաղներ, կորզում:

Ներածություն. Ազնիվ մետաղների պարունակությամբ ածխածնային ելանյութերի մշակման հիդրոմետալուրգիական գործընթացներում կորզվող ոսկին (Au) և արծաթը (Ag) կազմում են հումքում այդ տարրերի պարունակությունների մինչև 80%-ը, իսկ պլատինի խմբի մետաղների (ՊԽՄ) վերաբերյալ տվյալները հիմնականում բացակայում են [1-6]: Հիդրոմետալուրգիական եղանակի համեմատությամբ ավելի արդյունավետ են այդ ելանյութերի մշակման հալման՝ հալքանոթային ու բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզի (ԲԻՍ) հրամետալուրգիական գործընթացները, քանի որ օժտված են հումքում պարունակվող ազնիվ մետաղները համալիր կորզելու ունակությամբ: Մակայն տնտեսական նկատառումով վիճակն այստեղ բավարար չէ, քանի որ ըստ [7-9] աշխատանքների տվյալների՝ այդ գործընթացներում գոյացած խառամներում պլատինային մետաղները կազմում են հումքում պարունակության մոտ 40%-ը:

Հարկ է ընդգծել նաև, որ նշված գործընթացները բնության և մարդկանց առողջության համար խիստ վնասակար են, քանի որ դրանցում գոյանում են պինդ և ածխածնային գազերի տեսքով թունավոր արգասիքներ, որոնք աղտոտում են Երկիր մոլորակի վերգետնյա ու ստորգետնյա միջավայրերը: Նշված խնդիրները

լուծելու նպատակով արտադրության մեջ օգտագործվում են թանկարժեք գազափոշեկլանիչ սարքավորումներ, որոնք, հիմնականում, չեն ապահովում շրջակա միջավայրի մաքրության պահպանմանն անհրաժեշտ չափորոշիչները և նպաստում են արդյունահանվող ազնիվ մետաղների ինքնարժեքի բարձրացմանը:

Բերված տվյալները ցույց են տալիս, որ ազնիվ մետաղներ պարունակող ածխածնային ելանյութերի արդյունավետ մշակումը հնարավոր է արդիական տեխնոլոգիաներ ներդնելու շնորհիվ, քանզի գործող մետաղագործական գործընթացներում հումքի քիմիական առանձնահատկությունները բավարար հաշվառված չեն, կամ առկա են անավարտ բոլորաշրջաններ: Նշված բացթողումների արդյունքում գոյացած խնդիրները լուծելու համար մեր հետազոտությունում նպատակահարմար է մշակել մետաղակիր ածխածնային ելանյութի համալիր օգտահանման սկզբունքով գործող տեխնոլոգիա, որի առաջնահերթ նպատակը հումքում պարունակվող ազնիվ մետաղների կորզումն է:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդաբանության հիմնավորումը. Նշված նպատակի իրականացման համար աշխատանքում որպես ելանյութ օգտագործվել է տեղական ծագման ածխաբեր առաջացումների, գրավիտացման գործընթացով ստացված ազնիվ մետաղների ածխածնային խտանյութը: Համաձայն [10,11] աղբյուրների տեղեկատվության՝ Au-ի պարունակությունը այդ ելանյութում կազմում է 9,5 g/m , Ag-ինը՝ 48,0 g/m , պլատինինը (Pt) ու պալադիումինը (Pd) միասնաբար՝ 1,0 g/m , իսկ բոլոր ՊԽՄ-ինը՝ 8,0...10,0 g/m : Ռենտգենաֆազային և քիմիական վերլուծությունները ցույց են տվել, որ ածխածնից (C) և սիլիկահողից (SiO_2) հետո ելանյութում բարձր են FeS_2 , $CuFeS_2$, Fe_2C , SiC , TiO_2 , $FeRe$, $FePt$ և $FeMo$ ՝ քիմիական կայուն միացությունների պարունակությունները: Հետևաբար, ազնիվ մետաղների առավել կորզումը հնարավոր է ելանյութը լիարժեք քայքայելու պայմաններում, իսկ ածխածինը անհրաժեշտ է նախապես հեռացնել, քանի որ, հանդիսանալով մետաղների վերականգնիչ, նպաստում է թթվային լուծույթներում առկա ազնիվ մետաղների՝ սիլիկահողի հետ կորստին [5,6]: Վերը բերված տվյալները ցույց են տալիս նաև, որ ելանյութը օժտված է քիմիական մշակումների նկատմամբ կայունությամբ, որի հետևանքով հիմնական գործընթացին նախապատրաստելու նպատակով չեզոքացումը պահանջում է լրացուցիչ գործողություններ:

Հիմնվելով ածխածնային ելանյութի վերը ներկայացված քիմիական բնութագրերի ու տեխնիկական գրականությունից ստացվող տվյալների վրա՝ ազնիվ մետաղներ կորզելու նպատակով սույն փորձական հետազոտությունում նախապատվությունը տրվել է հումքի՝ տարբեր մետաղների քլորիդների հետ ջերմային մշակմամբ քլորացման մեթոդաբանությանը [12-15]: Ըստ նշված աղբյուրներից ստացվող տեղեկատվության՝ աղերով քլորացման գործընթացը, շնորհիվ քլոր տարրի տարբեր մետաղների հետ բուռն փոխազդելու առանձնահատկությանը, կնպաստի հումքում պարունակվող ազնիվ մետաղների համալիր կորզմանը:

Փորձերի ընթացքը և արդյունքները. Քլորացման փորձերում, ելանյութ՝ 80 գ զանգվածով ածխածնային խտանյութից բացի, փորձարկվել են դրա՝ մթնոլորտային ճնշման պայմանում թրծումով (500...800 °C, մոտ 2,0 ժամ) և ազոտական թթվով (HNO₃) ու աղաթթվով (HCl) տարրալուծմամբ (60...80 °C, 1,0 ժամ) ստացված թերայրուկները: Նշված փորձանմուշների՝ քիմիական մաքուր աղերի (NaCl, KCl և այլ) պայմաններում քլորացումը կատարվել է 500...800 °C ջերմաստիճանային տիրույթում՝ 1,0...1,5 ժամվա ընթացքում: Քլորացման փորձերում գոյացած եռակավածքը տարրալուծվել է աղաթթվի 200 մլ / լ խտությամբ լուծույթով ($P^H = 1,0...1,5$), որից հետո լուծույթ անցած ազնիվ մետաղները վերականգնվել են (60...80 °C, 3 ժամ) ածխածնով ներծծված երկաթով՝ ցեմենտացման եղանակով: Վերականգնված ազնիվ մետաղ պարունակող նստվածքներում (այսուհետ՝ ազնիվ մետաղական արգասիք) առկա Au-ի, Ag-ի և ՊԽՄ-ի վերլուծման [16,17] նպատակով օգտագործվել են հարգորոշիչ-գրավիմետրական, ընդ որում՝ մետաղական կուտակիչի հետ միահալմամբ բովազտման եղանակները: Փորձերում օգտագործված փորձանմուշների, դրանց քլորացման պայմանների ու արդյունքների վերաբերյալ տվյալները բերված են աղյուսակում:

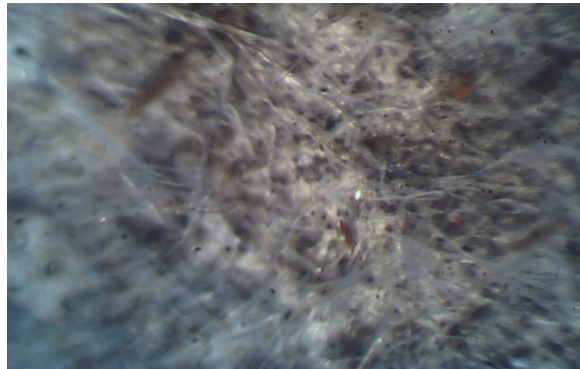
Աղյուսակ

Փորձերում ստացված ազնիվ մետաղական արգասիքների պարունակությունները՝ կախված քլորացնող փորձանմուշի և ազդանյութի տեսակներից ու ջերմաստիճանից

Փորձ h/h	Քլորացվող փորձանմուշներ		Քլորացման ազդանյութերը և ջերմաստիճանային տիրույթը, °C,	Ազնիվ մետաղական արգասիքները, $\frac{մգ}{գ/տ}$
	տեսակը	զանգ- վածք, գ		
1	Ածխածնային խտանյութ	80,0	NaCl (700...800)	56,5 / 706,0
2	Ածխածնային խտանյութ	80,0		57,2 / 715,0
3	Խտանյութի՝ HNO ₃ -ով մշակված, թերայրուկ	33,6		35,6 / 445,0
4	Խտանյութի թերայրուկ	65,0	NaCl+KCl (600...700)	87,6 / 1095,0
5	Խտանյութի թերայրուկ	64,0		87,5 / 1094,0
6	Խտանյութի՝ HCl-ով մշակված, թերայրուկ	52,0		88,7 / 1109,0
7	Խտանյութի՝ HCl-ով մշակված թերայրուկ	51,0	NaCl+KCl+այլ աղեր (450...500)	89,8 (1121,0)
8		52,0		89,6 (1120,0)
9		50,0		107,0 (1337,0)

Ազնիվ մետաղների մասին տվյալներ ստանալու նպատակով նախ հետազոտվել են 3, 4, 5 և 6 փորձերի արգասիքները: 3 և 5 փորձերում ստացված ազնիվ մետաղական արգասիքները մշակվել են խիտ աղաթթվով, որից հետո երկաթը և այլ ցածրարժեք մետաղները (մոտ 70%-ը) տեղափոխվել են լուծույթ, արդյունքում ստացվել է Au-ով, Ag-ով և ՊԽՄ-ով մոտ չորս անգամ հարստացած նստվածք: Վերջինս մշակվել է խիտ ազոտական թթվով, որի արդյունքում Ag-ը և Pd-ը լուծվել են: Լուծույթի հեռացումից հետո առանձնացած Au+ՊԽՄ մետաղների հիմքով նստվածքը կազմել է նշված փորձերում վերականգնված ազնիվ մետաղական արգասիքի զանգվածի մոտ 7,5%-ը: 4-րդ փորձում եռակալվածքի աղաթթվով տարրալուծված 87 մգ զանգվածով նստվածքը միահալվել է (1000...1100 °C) օքսիդալուծիչ նյութերի և կապարի օքսիդի հետ, որից գոյացած կապարի հիմքով վերկբլայի բովազտման (920...950 °C) ավարտին ստացվել է 2,35 մգ զանգվածով ազնիվ մետաղների ձուլածո: Վերջինիս՝ ազոտական թթվի լուծույթով տարրալուծման արդյունքները ցույց են տալիս, որ փորձում ստացված Au-ի պարունակությունը կազմում է 8,6 գ/տ, Ag-ինը՝ 23,6 գ/տ, իսկ պլատինային մետաղները ձուլածոյի կազմում գործնականորեն բացակայում են: 6-րդ փորձի եռակալվածքի՝ աղաթթվով տարրալուծված պինդ արգասիքի բովազտումը կատարվել է մետաղական կապարով միահալման (920...950 °C) եղանակով, որի ավարտին հալքանոթի հատակին նկատվում են արծաթի փայլով մետաղի հետքեր:

3 և 5 փորձերում ստացված ազնիվ մետաղական արգասիքների հարյուր անգամ խոշորացված պատկերները բերված են նկ.1 և 2-ում:



Նկ. 1. Թերայրուկի քլորացման եռակալվածքի աղաթթվով տարրալուծման լուծույթից վերականգնված ազնիվ մետաղական արգասիքի մանրակառուցվածքը



Նկ. 2. Աղաթթվով մշակված թերայրուկի քլորացման եռակալվածքի աղաթթվով տարրալուծման լուծույթից վերականգնված ազնիվ մետաղական արգասիքի մանրակառուցվածքը

Նկ. 1-ում պատկերված արգասիքում ակնհայտ են ոսկու և արծաթի տարբեր չափերով մասնիկներ, իսկ նկ.2-ում՝ թելիկների տեսքով պլատինային մետաղներ:

Արդյունավետությունը բարձրացնելու նպատակով 9-րդ փորձանմուշի քլորացման գործընթացից հետո առանձնացված սիլիկահողային նստվածքը տարրալուծվել է ազոտական թթվով, որից հետո լուծույթի կազմ տեղափոխված արծաթը վերականգնվել է աղաթթվով՝ AgCl -ի տեսքով: Վերջինիս անջատումից հետո Au -ի պարունակությամբ լուծույթը միավորվել է եռակալվածքի տարրալուծման լուծույթի հետ: Գոյացած միացյալ լուծույթի երկաթով ցեմենտացման արդյունքում վերականգնվել է 107,0 մգ զանգվածով ազնիվ մետաղական արգասիք, որին համապատասխանում է 1337,0 գ/տ պարունակությունը: Վերջինս բովազտման նպատակով օգտագործված կապարի հետ համատեղ հալումից ստացվել է 3,22 մգ զանգվածով $\text{Au} + \text{Ag} + \text{ՊԽՄ}$ -ի դեղին երանգով ձուլածո, որի պարունակությունը կազմում է 40,3 գ/տ: Այդ ձուլածոյի կազմից արծաթը տարրալուծվել է ազոտական թթվի նոսր լուծույթով, որից հետո ստացվել է 1,38 մգ զանգվածով ու 17,3 գ/տ պարունակությամբ $\text{Au} + \text{ՊԽՄ}$ -ի նստվածք: Ելանյութ խտանյութի կազմում առկա 9,5 գ/տ, Au -ի հաշվառումից հետևում է, որ այս փորձի վերջնական արգասիքում ՊԽՄ -ի ընդհանուր պարունակությունը կազմում է 7,8 գ/տ:

Արդյունքների ամփոփում և հետևություններ. 1, 2 փորձերի արդյունքները վկայում են, որ ածխածնային խտանյութի՝ NaCl -ի հետ մոտ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ջերմաստիճանում «չոր» թրծումը բացասաբար է անդրադառնում ազնիվ մետաղների կորզման գործընթացի արդյունքների վրա: Ածխածնային ելանյութի ուժեղ թթուներով մշակումը նույնպես ձեռնադրում է, քանի որ հանգեցնում է ազնիվ մետաղների զգալի կորուստների (փորձ 3): Այդ անցանկալի երևույթները զգալի են, հատկապես, փորձերի արգասիքների բովազտման՝ մետաղական կապարով միահալման

գործընթացներում: Խտանյութ թերայրուկի, $\text{NaCl}+\text{KCl}$ աղային խառնուրդով՝ $600\dots700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ջերմաստիճանային միջակայքում քլորացման 4, 5 փորձերում ստացված ազնիվ մետաղական արգասիքի պարունակությունը կազմել է մոտ 1095 գ/տ : Վերջինիս համեմատ՝ 6...8-ում փորձերում ստացված ազնիվ մետաղական արգասիքներն ավելացել են՝ հասնելով 1121 գ/տ . դրանցում ելանյութ թերայրուկների քլորացումը կատարվել է NaCl -ի հիմքով դյուրահալ ($450\dots560\text{ }^{\circ}\text{C}$) աղային խառնուրդով: Փորձերի արդյունքների ամփոփումից հետևում է, որ.

- եռակավածքի՝ աղաթթվով և ազոտական թթվով տարրալուծմամբ առանձնացված $\text{Au}+\text{Pt}$ -ի հիմքով նստվածքը կազմում է քլորացման գործընթացում վերականգնված ազնիվ մետաղական արգասիքի մոտ 7,5 զանգ. %-ը,

- եռակավածքի աղաթթվով տարրալուծումից հետո առանձնացված սիլիկահողում Au -ը և Ag -ը կազմում են ելանյութում պարունակությունների համապատասխանաբար՝ 80 և 50...60 %-ը,

- շնորհիվ NaCl -ի հիմքով դյուրահալ ($450\dots560\text{ }^{\circ}\text{C}$) աղային խառնուրդով քլորացմանը՝ գործընթացում կորզված ազնիվ մետաղական արգասիքը ավելանում է՝ հասնելով $1121,0\text{ գ/տ}$ -ի:

Ակնհայտ է նաև, որ առավել բարձր պարունակություններով ($1337,0\text{ գ/տ}$) ազնիվ մետաղական արգասիքների ստացումը հնարավոր է ածխածնային ելանյութը նախապատրաստելու և ստացված արգասիքների դյուրահալ աղային խառնուրդով քլորացման համակցված հիդրոմետալուրգիական եղանակով մշակման պարագայում, քանի որ ապահովվում է հումքում պարունակվող Au -ի և Ag -ի լիարժեք կորզումը, իսկ արդյունահանվող ՊԽՄ-ի քանակը հասնում է 80%-ի:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Раимжанов Б.Р., Якубов С.И.** Комплексная разработка металлоносных горючих сланцев с целью получения энергоносителей и металлов // Семинар № 13 Симпозиума "Неделя горняка". – 2009.- С. 286-289.
2. **Бызеев В.К., Тен В.Н.** Теоретические основы комплексной скважинной переработки горючих сланцев с получением энергоносителей и металлов // Горный вестник Узбекистана.- 2006.- № 1 (28). - С. 12-14.
3. Патент RU 2307861. МПК С 10 В 53/06. Способ безотходной переработки горючих сланцев / **В.А. Проскуляров, Г.И. Боровиков, А.М. Сыроежко и др.** – Оpubл. 29.03.2006.
4. Патент RU 92003683 А. МПК С 22В11/00. Способ извлечения золота из золы от сжигания / **В.Г. Лобанов, И.И. Стругучевский, С.М. Кричунов.**- 20.09.1995.
5. Patent US 4259107 A.Oxidation, acidification, and chlorination to prevent sequesteringduring subsequent cyanidation / **Wilbur J. Guay.** -31.03.1981.

6. **Башлыкова Т.В., Живаева А.Б., Башлыкова Н.В.** Воздействие бактерий на сорбционную активность углеродсодержащих руд // Горное дело, РЖ.- М., 2004, 7.04.07-10Д.- 123.
7. **Հայրապետյան Ս.Գ.** Ածխածնային հանքանյութերի ազնիվ մետաղների՝ հալքանոթային մեթոդով ստացման գործընթացի հետազոտումը // ՀԱՊՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու.- Երևան, 2016.- Մաս 2.- էջ 592-597:
8. **Հայրապետյան Ս.Գ., Մարտիրոսյան Վ.Հ., Տեր-Փալստյան Օ.Պ.** Ածխածնային հանքանյութերից ազնիվ մետաղների մետաղաթերմիական եղանակով կորզման գործընթացի հետազոտություն // ՀԱՊՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու.- Երևան, 2017. - Մաս 2.- էջ 848-855:
9. **Павлов Е.А., Мальцев Э.В., Гушинский А.А.** Энергосберегающий способ перевода в растворимую форму металлов - спутников платины // Известия Самарского научного центра / РАН.-2012.- Том 14, № 4(5).-С. 1273-1276.
10. **Այրապետյան Ս.Գ., Մարտիրոսյան Վ.Հ.** Исследование возможности извлечения золота и серебра из сланцевых углей Армении // Изв. НАН РА и НПУА. Серия Техн. науки.-2015.- Т. 68, № 2.- С. 149-153.
11. **Алоян П.Г., Алоян Гайк П.** Платиноиды в промышленных рудах Армении. - Ереван: ГЕОИД, 2003.-182 с.
12. **Плаксин И.Н.** Металлургия благородных металлов.-М.: Металлургиздат, 1958.- 360 с.
13. **Крылов В.В., Назаров Ю.Н., Котляр Ю.А.** Применение метода хлорирования в металлургии редких и платиновых металлов. -М.: Изд-во ЦНИИЭИ, 1981.-35 с.
14. Patent US 5074910A. Chlorination / **Michel Dubrovsky**.- 24.12.1991.
15. Патент JP S5675538A. МПК C22B 11/02, C22B 11/06. Метод хлорирования металлов платиновой группы / **Танака, Сюдзи, Нарасака, Нобуеоши**. - Оpubл. 22.06.1981.
16. Концентраты медные. Методы определения содержания золота и серебра ГОСТ 15934.10-82(СТ СЭВ 3276-81).- М.: Изд-во Стандартов, 1982.-12 с.
17. Пробоотбирание и анализ благородных металлов: Справочник / Под ред. **И.Ф. Барышникова**. -М.: Металлургия, 1978.- 432 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 03.12. 2018:

С.Г. АЙРАПЕТЯН, А.А. ПЕТРОСЯН

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ СОДЕРЖАЩИХСЯ В
УГЛЕРОДИСТОМ КОНЦЕНТРАТЕ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ
МЕТОДОМ СОЛЕВОГО ХЛОРИРОВАНИЯ**

Показано, что в процессе хлорирования углеродистого концентрата с реагентом NaCl (~800°C) и при купелировании (920...960°C) продукта, полученного в результате обработки образованного спека, имеют место потери благородных металлов. Эти нежелательные явления можно предотвратить путем предварительного отжига углеродистого концентрата (до 600°C), разложения химическими кислотами и сплавления (450...560°C) полученных продуктов со смесью плавких солей на основе NaCl. Выявлено, что для извлечения благородных металлов из состава кремнеземистых продуктов процесса хлорирования целесообразно применять гидрометаллургический метод кислотного выщелачивания, что позволяет восстановить полноценное извлечение золота и серебра, а извлечение платиновых металлов довести до 80%.

Ключевые слова: углеродистый концентрат, солевое хлорирование, спек, продукты благородных металлов, металлов платиновой группы, извлечение.

S.G. HAYRAPETYAN, A.A. PETROSYAN

**INVESTIGATING THE PROCESS OF EXTRACTING PRECIOUS METALS
CONTAINED IN THE CARBON CONCENTRATE BY THE METHOD OF SALT
CHLORINATION**

Studies have shown that in the course of chlorination of a carbon concentrate with a NaCl reagent (~ 800°C) and at cupellation (920 ... 960°C), the product obtained as a result of development of a formed cake, losses of precious metals take place. These undesirable phenomena can be prevented by preliminary annealing of a carbon concentrate (to 600°C), decomposition by chemical acid decomposition and alloying (450 ... 560°C) the obtained products with a mix of fusible salts on the basis of NaCl. It is also revealed that for extraction of precious metals from a structure of silicide products of the process of chlorination, it is expedient to apply the hydrometallurgical method of acid leaching that allows to restore the full extraction of gold and silver, and to bring platinum metals to 80%.

Keywords: carbon concentrate, salt chlorination, baked, products of precious metals, metals of platinum group, extraction.

D.S. SHALJYAN, S.A. AVUSHYAN, A.M. MOMJYAN, N.S. SHUKHYAN,
H.V. GUMROYAN, T.K. KAPLANYAN

IMPLEMENTING THE SENSOR FUSION OF THE GYROSCOPE AND A
COMPASS BASED ON THE KALMAN FILTER

This paper presents the accuracy enhancement of the observed magnetic declination by applying a sensor fusion algorithm. Sensor fusion is executed based on the Kalman filter, which uses the measurements of the gyroscope and the magnetometer (compass) and produces an estimate of the magnetic declination. The latter tends to be more accurate than the measurement itself. Implementation results of the Kalman filter are presented to verify the enhancement of the magnetic declination accuracy.

Keywords: sensor fusion, Kalman filter, compass, magnetometer, magnetic declination, gyroscope.

Introduction. Current MEMS motion sensors generate an output signal with some undesirable disturbances mixed. The presence of disturbances can cause unacceptable issues in the embedded systems. To reduce those irregular fluctuations from the observations, sensor fusion algorithms are used. Sensor fusion is a software, which combines data from several sensors to achieve more accurate and reliable system performance than it could be obtained by using only a single, individual sensor [1].

This paper produces a sensor fusion algorithm based on the observations of the gyroscope and the magnetometer (compass) to enhance the accuracy of magnetic declination. The implementation of the sensor fusion is done based on the Kalman filter. Kalman filter is an algorithm, which uses measurements from sensors acquired over time, and produces estimates of unknown variables that are considered more precise than those based only on a single measurement [2]. The main advantage of the Kalman model is that it is a recursive filter, and that it does not need to keep the measurements' history other than the state obtained at the previous time step [3]. Kalman filter is suitable for high-speed sensors, which makes it convenient for real-time problems [4].

The simulation of the real-time Kalman filter algorithm is executed in the system design platform LabVIEW, and the obtained results during the simulation procedure are presented in this paper.

$$X_k = F_k X_{k-1} + B_k u_k + w_k, \quad (1)$$

where

- X_k is the current state estimate (at time k);
- X_{k-1} is the previous state estimate (at time k-1);
- F_k is the state transition (prediction) matrix;
- u_k is the control vector;
- B_k is the control input matrix;
- w_k is the process noise, which is assumed to be drawn from zero mean

multivariate normal distribution with covariance Q_k .

The state estimate matrix X_k contains two variables. The first variable is the magnetic declination value presented in degrees and the second variable is the angular velocity of yaw axis presented in degrees per second:

$$X_k = \begin{bmatrix} \alpha_{MD|k} \\ \omega_{z|k} \end{bmatrix}.$$

Based on the $\alpha_k = \alpha_{k-1} + \omega_k dt$ kinematic relation between the rotational angle and angular velocity (time period $dt = 10$ ms), the state transition matrix, which is applied to the previous state X_{k-1} , will be:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.01 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Control-input matrix B_k and control vector u_k are set to zero matrixes by disregarding the control input variables. The virtual instrument (VI), which predicts the current state estimate according to equation (1), is presented in Figure 2. The F_k , X_{k-1} , B_k , u_k and w_k matrixes are declared as inputs and X_k is declared as an output matrix.

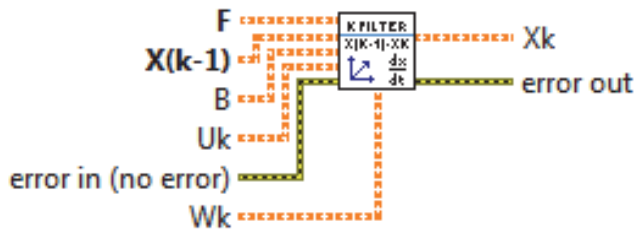


Fig.2. “Current state prediction” VI

The error covariance matrix at the current state (at time k) is obtained from the previous state (at k-1 time) according to [7]

$$P_k = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k, \quad (2)$$

where

- P_k is the error covariance matrix at the current state (at k time);
- P_{k-1} is the error covariance matrix at the previous state (at k-1 time);
- F_k^T is the transpose of F_k matrix, $F_k^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0,01 & 1 \end{bmatrix}$;
- Q_k is the covariance matrix of the process noise.

Covariance matrix Q_k is obtained during the testing procedure of the system:

$$Q_k = \begin{bmatrix} \text{var}(\alpha) & \text{cov}(\alpha, \omega_z) \\ \text{cov}(\omega_z, \alpha) & \text{var}(\omega_z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,00022 & 0 \\ 0 & 0,00006 \end{bmatrix}.$$

The virtual instrument, which predicts the covariance matrix based on equation (2), is presented in Figure 3. F_k , P_{k-1} , Q_k matrixes are declared as input variables and P_k is declared as an output variable. The initial value of error covariance matrix P_0 is set to the identity matrix.



Fig.3. "Covariance matrix prediction" VI

After the accomplishment of the prediction phase, the current state is computed, and the Kalman filter obtains the observations from sensors. At time k, the observation matrix Z_k is made according to [8]:

$$Z_k = H_k X_k + v_k, \quad (3)$$

where

- Z_k is the observation at the current state (at time k);
- H_k is the observation model;
- v_k is the error observation noise which is assumed to be zero-mean. The Gaussian white noise with covariance R_k .

The observation matrix Z_k consists of magnetic declination acquired by the compass and the angular velocity of the yaw axis measured by the gyroscope:

$$Z_k = \begin{bmatrix} \alpha_{MD|k|obs.} \\ \omega_{z|k|obs} \end{bmatrix}.$$

The H_k observation matrix is established as an identity matrix, due to the observation matrix Z_k and the current predicted state X_k are on the same scale:

$$H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

During the second phase, which is called “Update” phase, the predicted state is fused with the current observation information to produce the best estimate of the state [9]. The information flow of the Kalman filter during the one time step is introduced in Figure 4.

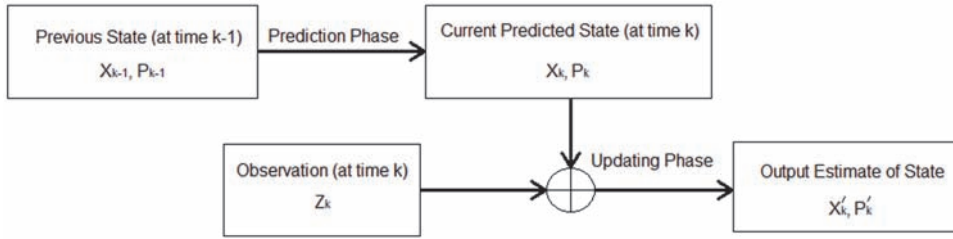


Fig.4. Kalman filter information flow

X'_k and P'_k are respectively the updated (best) state estimate and covariance matrixes. These matrixes are considered to be the output state of the Kalman filter. They are considered to be the output results of the current time step and, correspondingly, the initial variables for the next time step. They are computed by the equations below [10]:

$$X'_k = X_k + K'(Z_k - H_k X_k), \quad (4)$$

$$P'_k = P_k - K' H_k P_k, \quad (5)$$

where K' is the Kalman filter's gain which is calculated according to:

$$K' = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R_k)^{-1}. \quad (6)$$

R_k is the covariance matrix of the observation noise. Since the observations from the sensors are uncorrelated, the covariance of the measured MD and angular velocity will be zero. The variance of the measured magnetic declination and the variance of the measured angular velocity are obtained during the system testing procedure according to the sensor's accuracy:

$$R_k = \begin{bmatrix} \text{var}(\alpha_m) & \text{cov}(\alpha_m, \omega_{z|m}) \\ \text{cov}(\omega_{z|m}, \alpha_m) & \text{var}(\omega_{z|m}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,22 & 0 \\ 0 & 0,06 \end{bmatrix}.$$

The virtual instrument, which updates the state estimate based on the equation (4), is presented in Figure 5-a. The Z_k , H_k , X_k , and K matrixes are declared as inputs and X'_k is declared as an output.

The updating process of the covariance matrix is done by “Updating covariance matrix” VI (Figure 5-b) based on equation (5). H_k , P_k , K are declared as input variables, P'_k is declared as an output variable.

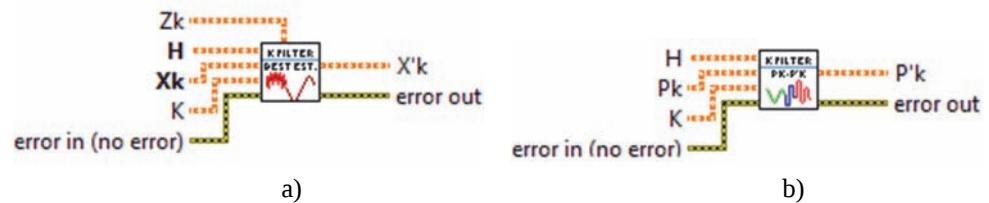


Fig.5. “Updating current state” VI (a), “Updating covariance matrix” VI (b)

Results of investigation. Figure 6 shows the obtained results when the system does not rotate (a), and the system rotates around the Z-axis (b). The red plot presents the magnetic declination (MD) acquired directly from the compass and the green plot presents the filtered magnetic declination value.

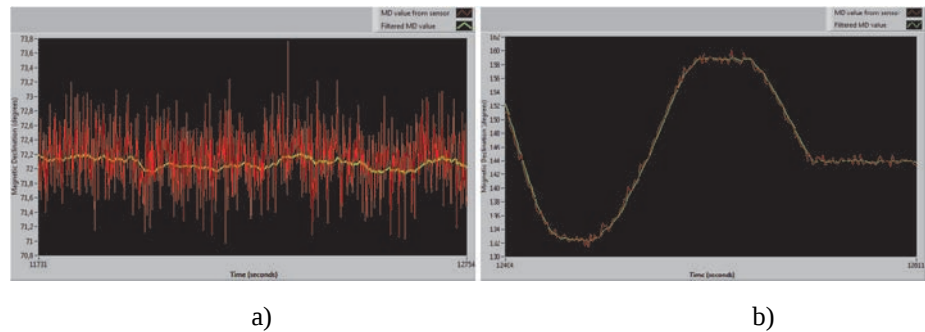


Fig.6. The obtained results during the investigation. Red plot: MD value measured from the compass, green plot: the filtered MD value when the system does not rotate (a), and when the system rotates around the Z-axis (b)

Conclusion. The sensor fusion of gyroscope and magnetometer (compass) based on the Kalman filter is implemented in the LabVIEW environment. The investigation results are presented in Figure 6. The latter verifies that the Kalman filter enhances the accuracy of magnetic declination by more than 10 times.

REFERENCES

1. **Elmenreich W.** Sensor Fusion in Time-Triggered Systems / Vienna University of Technology. - Vienna, Austria, October 2002. - 173 p.
2. Use of Kalman Update Algorithm for vivid enhancements of GPS and navigation / **T.N. Mamidwar, N.P. Bandal, K.U. Kanhere, et al** // International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies. - 2014. - Vol. 2, issue 2. - P. 64 -72.

3. Use of Kalman Update Algorithm for vivid enhancements of GPS and navigation / **T.N. Mamidwar, N.P. Bandal, K.U. Kanhere, et al** // International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies. - 2014. - Vol. 2, issue 2. - P. 64 -72.
4. **Shyam M.M., Naren N., Gemson R.M.O., Ananthasayanam M.R.** Introduction to the Kalman Filter and Tuning its Statistics for Near Optimal Estimates and Cramer Rao Bound / Indian Institute of Technology Kanpur. - Kanpur, India, February 2015. - 402 p.
5. Jitter removal in KUKA KR-5 using Modified Kalman Filter while tele-operating with Exoskeleton / **S. Rawal, S. Kansal, M. Zubair, et al** // The 8th Asian Conference on Multibody Dynamics. - Kanazawa, Japan, August 2016. –
https://www.researchgate.net/publication/305703431_Jitter_removal_in_KUKA_KR-5_using_Modified_Kalman_Filter_while_tele-operating_with_Exoskeleton
6. Jitter removal in KUKA KR-5 using Modified Kalman Filter while tele-operating with Exoskeleton / **S. Rawal, S. Kansal, M. Zubair, et al** // The 8th Asian Conference on Multibody Dynamics - Kanazawa, Japan, August 2016. –
https://www.researchgate.net/publication/305703431_Jitter_removal_in_KUKA_KR-5_using_Modified_Kalman_Filter_while_tele-operating_with_Exoskeleton
7. Jitter removal in KUKA KR-5 using Modified Kalman Filter while tele-operating with Exoskeleton / **S. Rawal, S. Kansal, M. Zubair, et al** // The 8th Asian Conference on Multibody Dynamics. - Kanazawa, Japan, August 2016. –
https://www.researchgate.net/publication/305703431_Jitter_removal_in_KUKA_KR-5_using_Modified_Kalman_Filter_while_tele-operating_with_Exoskeleton
8. Jitter removal in KUKA KR-5 using Modified Kalman Filter while tele-operating with Exoskeleton / **S. Rawal, S. Kansal, M. Zubair, et al** // The 8th Asian Conference on Multibody Dynamics. - Kanazawa, Japan, August 2016. –
https://www.researchgate.net/publication/305703431_Jitter_removal_in_KUKA_KR-5_using_Modified_Kalman_Filter_while_tele-operating_with_Exoskeleton
9. Use of Kalman Update Algorithm for vivid enhancements of GPS and navigation / **T.N. Mamidwar, N.P. Bandal, K.U. Kanhere, et al** // International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies. - 2014. - Vol. 2, issue 2. - P. 64 -72.
10. Jitter removal in KUKA KR-5 using Modified Kalman Filter while tele-operating with Exoskeleton / **S. Rawal, S. Kansal, M. Zubair, et al** // The 8th Asian Conference on Multibody Dynamics. - Kanazawa, Japan, August 2016. –
https://www.researchgate.net/publication/305703431_Jitter_removal_in_KUKA_KR-5_using_Modified_Kalman_Filter_while_tele-operating_with_Exoskeleton

National Polytechnic University of Armenia. The material is received 04.03.2019.

**Դ.Ս. ՇԱԼԶՅԱՆ, Ս.Ա. ԱՎՈՒՇՅԱՆ, Ա.Ս. ՄՈՍԶՅԱՆ, Ն.Ս. ՇՈՒԽՅԱՆ,
Հ.Վ. ԳՈՒՄՐՈՅԱՆ, Տ.Կ. ԿԱՊԼԱՆՅԱՆ**

**ԳԻՐՈՍԿՈՊԻ ԵՎ ԿՈՂՄՆԱՑՈՒՅՑԻ ԶԱՓՈՒՄՆԵՐԻ ՄԻԱԶՈՒԼՄԱՆ
ԻՐԱԿԱՆԱՑՈՒՄԸ ԿԱԼՄԱՆԻ ՋՏԻՉԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ**

Ներկայացված է չափված մագնիսական հակման արժեքի ճշտության լավարկումը՝ կիրառելով տվիչների միաձուլման ալգորիթ: Տվիչների միաձուլումն իրականացված է Կալմանի գոիչի կիրառմամբ, որն օգտագործելով գիրոսկոպի և մագնիսաչափի (կոդմնացույցի) չափումները՝ կատարում է մագնիսական հակման հաշվարկ: Վերջինս հակված է ավելի մեծ ճշգրտության, քան սկզբնական չափումը: Կալմանի գոիչի իրականացման արդյունքները ներկայացվում են՝ հաստատելու համար մագնիսական հակման ճշգրտության լավարկումը:

Առանցքային բառեր. տվիչների միաձուլում, Կալմանի գոիչ, կոդմնացույց, մագնիսաչափ, մագնիսական հակում, գիրոսկոպ:

**Д.С. ШАЛДЖЯН, С.А. АВУШЯН, А.М. МОМДЖЯН, Н.С. ШУХЯН,
Р.В. ГУМРОЯН, Т.К. КАПЛАНЯН**

**СЛИЯНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ГИРОСКОПА И КОМПАСА НА ОСНОВЕ
ФИЛЬТРА КАЛМАНА**

Рассматриваются вопросы повышения точности измеренного магнитного отклонения путем применения алгоритма слияния датчиков. Слияние датчиков выполняется на основе фильтра Калмана, с помощью которого, используя измерения гироскопа и магнитометра (компас), производится вычисление магнитного отклонения. Последнее имеет тенденцию быть более точным, чем само измерение. Представлены результаты реализации фильтра Калмана для подтверждения повышения точности магнитного отклонения.

Ключевые слова: слияние датчиков, фильтр Калмана, компас, магнитометр, магнитное отклонение, гироскоп.

N.P. HAKOBYAN

**A SYSTEM FOR TRANSFORMING IMAGES TO SYMBOLIC PRESENTATION
FOR COMBINATORIAL DEFENSE AND COMPETITION PROBLEMS**

We aim to develop tools for regular transformation of combinatorial defense and competition problems' situations to their symbolic presentation by machine learning solutions. As it is proven, that RGT class problems are reducible to each other, in this paper we demonstrate a developed ANN model to detect the chess board from an image and classify the chess pieces. Two models were developed – a simple one which provides high accuracy as some complex models worldwide, and the second approach (based on a new method), which correctly fits for other RGT problems with a bit lower accuracy.

Keywords: neural networks, image classification, object detection, systemic classifications, algorithms.

1. Introduction**1.1. Background of the research**

Cognitive Algorithms and Models research directions include the ones in Artificial Intelligence and aim to develop constructively regularized models of human approaches in solving combinatorial problems.

There are different lines of researches in this area, e.g. machine learning solutions, such as neural networks, that concentrate on modeling of biological nature of the human brain.

Following the line of Cognitive Algorithms and Models research directions, we concentrate on the development and applications of cognitive functions to a class of combinatorial problems defined as problems where spaces of solutions are Reproducible Game Trees (RGT) [1-3].

1.2. RGT class

RGT class includes important problems like computer networks intrusion protection, optimal management and marketing strategy elaboration in competitive environments, defense of military units from a variety types of attacks, communication problems, certain types of teaching, chess and chess-like games [2].

In the continuous researches of our team, a class of problems is defined as a class of unsolved combinatorial problems [3].

The class named RGT is a subclass of Optimal Strategy Provision (OSP) problems. The RGT problems meet the following requirements:

- there are (a) interacting actors (players, competitors, etc), performing (b) identified types of actions in the (c) specified types of situations;
- there are identified utilities, goals for each actor;
- actions for each actor are defined.

Actors perform their actions in specified periods of times and do affect situations by actions in time t by transforming them to new situations in time $t+1$ trying to achieve the best utilities on that situations (goals) by regularities defining these actions.

1.2.1. Achievements in RGT and some open questions

There are certain achievements for the RGT class, some of which are listed below:

The proposed in [4,5] theory of mental doings provides ways for constructive and adequate models of various cognitive functions, e.g. classification, explanation, etc. We have implemented a knowledge-based expert system, RGT Solver18, which is able to utilize those cognitive functions.

The developed software can examine the developed models for systemic classifiers of RGT problems: algorithms and structures have been developed to provide an adequate description of systemic classifiers and to ensure their correspondence [6], and their adequacy were demonstrated by experiments [7].

RGT class combinatorial problems are reducible to each other [8].

The results of the work are applicable to the actual problems of real-time detection of means of attack and protection of the enemy with the help of autonomous drones and making the best decisions of counteraction (attack, retreat, investigation) in such situations. In [9], the defense of navy from air threats is described as a RGT class problem and certain solutions are provided.

The natural situations of different problems are presented differently, while the transformation of natural situations (images) into software-presented ones (symbolically) is another widely discussed topic of the study with frequently provided solutions of machine learning [10, 11].

Particularly, in [11], the author introduces a new method of object detection, which can be useful for some RGT problems situations' processing and ensures the effectiveness and fast-working process. It also detects the hidden objects, which cannot be detected adequately by a human without any tools. However, the solution is provided for sequential frames processing and not for single images.

We consider the transformation of a situation to Solver as a computer vision problem, particularly, image classification and object detection. Since Neural networks are the leading method of solving such problems all over the world, we have also chosen them as a tool.

Currently, the first layer of Solvers is a symbolical input (Fig. 1), which is done by experts/programmers.

The natural presentation of situations are different (Fig. 2) and, currently, there is no way to pass the image presentations of situations to the Solver in a regular way. Thus, in the current work we aim to develop an interface for regular transformation of natural presentations of situations into Solver environment. The problem can be divided into two subtasks:

```
[{"cx": 0, "cy": 0, "fc": 2, "ft": 4},
{"cx": 0, "cy": 1, "fc": 2, "ft": 3},
{"cx": 0, "cy": 2, "fc": 0, "ft": 0},
{"cx": 0, "cy": 3, "fc": 0, "ft": 0},
{"cx": 0, "cy": 4, "fc": 0, "ft": 0},
{"cx": 0, "cy": 5, "fc": 2, "ft": 4},
{"cx": 0, "cy": 6, "fc": 2, "ft": 6},
{"cx": 0, "cy": 7, "fc": 0, "ft": 0},
{"cx": 1, "cy": 0, "fc": 0, "ft": 0},
{"cx": 1, "cy": 1, "fc": 2, "ft": 2},
...]
```

Fig. 1. Symbolic presentation in the Solver



Fig. 2. Natural Presentations of Situations: Battles (Left) and Chess (right)

- Detecting the situations from the given image.
- Modifying the situation to acceptable for the Solver form.

1.2.2. Battle Field as RGT class problem

The Battle Field can be considered as a RGT problem by the following interpretation (Fig. 3):

- The battling sides can be considered as interacting actors;
- Military units' movements, attacks can be considered as actions;
- The battle field area including the military units can be considered as situations;
- Different situations can be considered as goals: capture objects, destroy enemy units, push frontline.



Fig. 3. Actors and Actions in Battle Field Problem

1.3. Related Works

During our research several works to detect the chess board and do piece classification were considered. In most researches (3D objects) the board, detection is done via image processing and not machine learning by using the already developed model from opencv. (canny edge detection and Hough line detection) [12].

In [13], the author describes the developed model for 3D objects/images, using the mentioned opencv model for board detection and Caffe deep learning framework and pre-trained AlexNet [14] and achieved pretty high 99% accuracy. The shortcomings of the model are a few: a) the model is too dependent on certain construction of the board and pieces, i.e. it works badly for the pieces and the board of other construction than the training set does.

The Chessify project, launched by Fimeteck LLC ([15]) in 2016 provides a solution for chess board detection and piece classification for 2D objects with pretty high accuracy. However, Chessify is the best among similar solutions worldwide by universalization, it still supports only 2D detections and is not open-source.

In [16] the model described by the author for the chess board detection avoids using the opencv module but includes the manual selection of the four corners of the board in the specified order, which we also aim to automatize since in other than chess situations it might be hard to specify boundaries of the situation manually. However, the model uses SVM for training and is simpler than other models, the accuracy of the pieces' classification is much lower (~85%), and it is still dependent on certain shapes of figures (training dataset).

All the described models and others researched have several disadvantages that we aim to avoid, if possible, while building our own model – a) dependence over certain shapes of board and pieces (the most common issue); b) complex models; c) low accuracy.

1.4. Current work

Currently, the input layer in the RGT Solver is provided by experts/programmers in a symbolical way.

We aim to develop a tool for regular passing of natural (image) presentations of RGT situations to symbolical ones in the RGT Solver. For this purpose, we are using ANN.

As it is proven, the RGT class problems are reducible to each other, we are providing experiments for chess, so the current work concentrates on the chess situations and pieces.

The existing models offer a classification for certain types of pieces – training of NN was done on the exact board and pieces. Its achievement is 99 % by

the test (same types), but if we change the figure shapes somehow (take another board and other pieces with different shapes) the result will be lower. We aim to enhance the classification to be universal for detection of different shapes of figures.

For the users' convenience, we have developed models both for 2D and 3D images. For experimenting we concentrate more on 2D objects.

We discuss the parallels and the possibility of transmission of the achieved results of chess to the battle field problem in this paper as well.

We provide two algorithms for our purpose – each of them will be described in separate sections.

2. Simple Algorithm

The task is as follows: Given the image of the chess board, it is necessary to classify each field as an empty one or a certain figure depending on its color and type (black rook, white pawn etc).

In other words, this task can be stated as follows: to classify nuclear classifiers from the situation, which are attributes of pieces for chess: color, type and coordinates.

2.1. Chess Piece Classification

2.1.1. 2D images

2.1.1.1. Dataset

A dataset of around 300 images of chess boards with existing figures on them was collected. A Python script was written to split the board into 64 equal



Fig. 4. Samples from Dataset of Chess Pieces

squares (8 rows, 8 columns). The pieces constructions are of various types which insures universalization of the model. Each of the 64 received images of every picture includes either an empty square or a figure with certain color and figure type, which was annotated. The dataset was split randomly into training and testing sets by a 3:1 ratio. There are overall 13 classes numerated from 0 to 12, where 0 corresponds to an empty field, 1 to 6 is for white pawn, bishop, knight, rook, queen and king and from 7 to 12 for black pieces with the same order. Some samples from the dataset are shown in Fig. 4.

2.1.1.2. Learning

Keras was chosen as the neural network library for our model, which was trained to classify the pieces on images on the described dataset. VGG-like ([13]) convolutional network of the following construction is selected:

- 2 convolutional layers with 32 neurons and kernel size of (3,3),
- Max-Pooling layer with a pooling size (2,2),
- 2 convolutional layers with 64 neurons and kernel size of (3,3),
- Max-Pooling layer with a pooling size (2,2),
- Flattening the 2D arrays for fully connected layers,
- 3 Dense layers with 256, 128, 64 neurons correspondingly and with RELU activation,
- The last layer is dense layer with 13 classes (for each of classes of our classification) and Softmax activation.

2.1.1.3. Results

The accuracy of 97.3 % on the test dataset of piece classification was achieved. The corresponding confusion matrix is provided in Fig. 5.

2.1.2. 3D images

[13] was taken as the base for this work. The dataset was collected as combination of datasets provided in [13], [16] and manually collected dataset of various constructions, which ensures some universalization of the model. As long as all our models are built in Keras, and there is no built-in model for AlexNet there, we choose the VGG-16 as our model. Accuracy of 94.2 % is achieved.

3. Enhanced Algorithm

The algorithm includes several steps

3.1. Detecting Pieces

The dataset of chessboard images including the chess pieces and empty fields was collected. All chess figures were marked and labeled in each of these images using LabelImg [18]. We have built ANN based on the collected dataset to detect the chess pieces from the board.

3.2. Coordinate Comparison

After detecting the pieces, we have a set of pieces with coordinates (x1; x2; y1; y2).

For farther simplicity, let's denote the following:

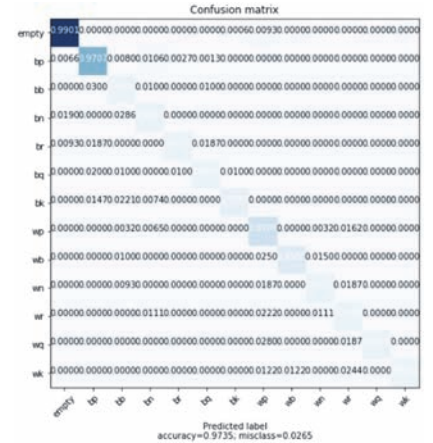


Fig. 5. Confusion Matrix of Piece Classification

F – set of received figures
 X, Y – set of received coordinates (both from R^2 dimension)
coordinates($x'_i; y'_i; x''_i; y''_i$) correspond to the figure f_i
 $A_x = avg(x'' - x'), for(x'; x'') \in X$ – the mean side of field (horizontal)
 $A_y = avg(y'' - y'), for(y'; y'') \in Y$ – the mean side of field (vertical)

The next step is to understand how many rows or columns are between certain two figures. As long as all the fields' dimensions are nearly equal (the more the angle of shooting differs from 90°, the less equal they are), we use the following equation to determine the number of the rows between figures f' and f'' with coordinates $[y1', y2']$ and $[y1'', y2'']$:

$$r \sim \frac{(y'_2 - y'_1) + (y''_2 - y''_1)}{2 \times A_y}, \quad (1)$$

where r is the number of the rows between the figures. In the future we will research how this equation should change if the angle of shooting is higher or lower than 90°. Here we just round the received number to the nearest integer (it can also be negative, negative rows mean movement to the left and negative columns mean movement down).

The same is done for columns and the equation is analogic.

3.3. Creating Initial Board

Now it is time to merge the received figures together. The algorithm works as follows: one of the pieces is taken as an initial point with the row index and the column index equal to 0; on each iteration, the program chooses a not yet considered figure and counts the number of rows and columns by equation (1) and saves the results as a tuple (f, r, c), where f is the figure type (black bishop, white rook etc), r and c are the indexes of row and column correspondingly (can be negative).

After all iterations, the program gets the minimum number of all column indexes, if it is negative, it sums all the received tuples' third element by the absolute value of the minimum number. The same thing is being done for rows.

At the end, we receive coordinates for each figure.

We fill the missing values with empty fields – for example, if we have some figures on coordinates (0;0) and (0;3), but there is nothing in (0;1) and (0;2), we fill them with empty fields.

3.4. Extending Board by missing lines/rows

If the initial board had an empty corner row(s) or column(s) they would be missing after these steps and we would have a matrix with dimensions 7x8 (8x7) (if only one row (column) was empty). The task is to find on which of 2 sides the empty row must be added.

Actually, this task is local for chess and probably would not appear in other RGT class problems. For instance, in the Battle Field problem, after detecting all military units, all ‘fields’ or ‘areas’ around (maybe with some limited range depending on zone where it is possible to hold fights) can be considered as empty. Of course, this brings about another task, to detect, for example, a field, a flatland, or which parts of the area are plateau, which can affect the possible movements there, but this is also a local problem and would be considered in future in more detailed researches on the Battle Field problem.

We take all empty fields we have in our received board and compare the images (currently we use histogram comparison, but this approach has to be improved and will be researched in future) of those fields to each of 8 parts of a new line from top. If all the 8 parts match (more than the parts of the other line) with some empty fields in our board, then we consider the line as searched. We do the same for each side and we make as many iterations as many lines are missing.

4. Application in the RGT Solver

After both modules for board detection and piece classification are ready, the already classified figures and empty fields are processed to JSON format as it is described in the picture below. The Solver receives a list of 64 JSONs as an input (Fig. 1) each of which refers to a certain field and contains nuclear classifiers’ values. For example, the first raw of this image corresponds to the field with coordinates (0, 0), which is a8 on chess board, figure color on that field is black (2) and figure type is rook (4). Finally, the chess situation in the usual for the Solver format is achieved and systemic classifications are processed.

Table 1

Comparison of the Results

Criterion/Method	Simple Algorithm	Enhanced Algorithm	Chessify	Chess ID	ChessVision
Accuracy	97.3%	95.1%	Unknown (high)	99%	85%
Universalization	Yes	Yes	Yes	No	No
Open-Source	Yes	Yes	No	Yes	Yes
Costly Training	No	Yes	Unknown	Yes	No
Used Model or Method	VGG-like ANN	Mobilenet SSD	Unknown	AlexNet	SVM
Automate Board Detection	Yes (openCV)	Yes	Yes	Yes (openCV)	No (needs marking)

5. Parallels with Battle Field Problem

5.1. Classifying Units

For the Battle Field problem, tanks, rockets etc can be considered as units. Military units in the given image should be classified similar to the units in chess.

5.2. Difficulties

Some difficulties appear at transforming the chess advances to the battle field:

1. Quality data – if the chess piece constructions are the same all over the world, the weapons are different in different countries. Anyway, the most popular types are of the same construction (e.g. tanks)
2. Classifying the actor/side – for the chess it is simple – the actor can be classified just by the piece's color. For the battle field, it is harder because battling sides' military units of the same type difference is sometimes even harder to detect by a human. This is still possible to realize, it is just harder than the corresponding task for chess.



Fig. 6. Military Units of Different Countries: Armenia (left) and Azerbaijan (right)

3. Angle – Angle of unit in an image and camera was not much an important task for chess, as long as it is not hard to change the angle for the photographer, while for the battlefield it is sometimes possible to shoot only from a limited number of places/angles. These also makes the minimal required quality of the dataset higher.

Conclusion

Methods for the situation's natural presentation transformation to Solver's symbolic presentation are proposed. Algorithms use Neural Networks for classification/detection of units and are described for certain RGT class problem – chess. The first algorithm includes classification of chess pieces, the second one – detecting the chess pieces from an image and detecting board by them. The

discussed models were integrated with Solver 18. The possible applications of solutions for battle field problems are described and some difficulties over battle field interpretation by chess solutions are listed. Implementation of the model for Battle Field problem, including dataset collection, researching ways for solution of described difficulties and ANN training are considered as the future steps.

References

1. **Pogossian E.** Adaptation of Combinatorial Algorithms. - Yerevan: Academy of Sciences of Armenia, 1983. - 293 p.
2. **Pogossian E.** On Modeling Cognition // Computer Science and Information Technologies (CSIT11). - Yerevan, Sept.26-30, 2011.
3. **Grigoryan S.** Research and development of algorithms and programs of knowledge acquisition and their effective application to resistance problems: PhD. - Yerevan, Armenia, 2016. - 111 p.
4. **Pogossian E.** Constructing adequate mental models // Transactions of IIAP NAS RA, Mathematical Problems of Computer Sciences. – 2018. - Vol. 50. - P. 35-51.
5. **Pogossian E., Grigoryan S., Hakobyan N.** On Systemic Classifications and Machine Learning // Computer Science and Information Technologies. – 2017. - P. 102-108.
6. **Grigoryan S., Hakobyan N. and Vrtanesyan H.** Object-oriented modeling of matching to systemic classifiers // Transactions of IIAP NAS RA: Mathematical Problems of Computer Sciences.- 2018. - Vol. 48. - P. 115-121.
7. **Grigoryan S., Hakobyan N.** Experimenting with acquisition of and matching to Systemic Classifiers // Transactions of IIAP NAS RA: Mathematical Problems of Computer Sciences. – 2018. - Vol. 50. -P. 96-103.
8. **Pogossian E.** Combinatorial Game Models For Security Systems, in NATO ARW on “Security and Embedded Systems”.- Porto Rio, Patras, Greece, 2005.
9. **Pogossian E.** Effectiveness Enhancing Knowledge Based Strategies for SSRGT Class of Defense Problems NATO ASI 2011 Prediction and Recognition of Piracy Efforts Using Collaborative Human-Centric Information Systems.- Salamanca, Spain, 2011.
10. **He, K., Ren, S., Sun, J., & Zhang, X.** Deep Residual Learning for Image Recognition.- 2016.- CoRR, abs/1512.03385.
11. **Simonyan R.,** Development of object detection, classification and positioning system: PhD. - Yerevan, Armenia, 2018. - 115 p.
12. https://docs.opencv.org/2.4.13.7/doc/tutorials/calib3d/camera_calibration_square_chess/camera_calibration_square_chess.html
13. **Yang D.,** Building Chess Id, <https://medium.com/@daylenyang/building-chess-id-99afa57326cd>, 2016.
14. <https://en.wikipedia.org/wiki/AlexNet>
15. <https://chessify.me>
16. **Ding J.,** ChessVision: Chess Board and Piece Recognition, 2016.
17. **Simonyan K., Zisserman A.,** Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition - Computer Vision and Pattern Recognition, 2015.

18. <https://github.com/tzutalin/labelImg>

Russian-Armenian (Slavonic) University. The material is received 15.04.2019.

Ն.Պ. ՀԱԿՈԲՅԱՆ

ՊԱՏԿԵՐՆԵՐԸ ՄԻՄՎՈԼԻԿ ՆԵՐԿԱՅԱՑՄԱՆ ՓՈԽԱՐԿԵԼՈՒ ՀԱՄԱԿԱՐԳ ՊԱՇՏՊԱՆՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՄՐՑԱԿՑԱՅԻՆ ԿՈՄԲԻՆԱՏՈՐ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ

Առաջարկվել են իրավիճակի բնական ներկայացումը Solver ծրագրային ապահովման սիմվոլիկ ներկայացմամբ փոխակերպելու մեթոդներ: Ալգորիթմներում, որոնք նկարագրվում են RGT դասի որոշակի խնդրի՝ շախմատի համար, կիրառվում է նեյրոնային ցանցերով ուսուցում՝ օբյեկտների ճանաչման և հայտնաբերման համար: Առաջին ալգորիթմը ներառում է շախմատային խաղաքարերի դասակարգում, երկրորդը՝ պատկերից շախմատային խաղաքարերի, իսկ վերջիններիս միջոցով՝ տախտակի ճանաչում: Վերոնշյալ մոդելները ինտեգրվել են Solver18-ին:

Նկարագրվում է ստացված լուծումների հնարավոր կիրառությունը ռազմական որոշակի խնդիրներում, և քննարկվում են այդ խնդիրների մեկնաբանման հետ կապված որոշ դժվարություններ: Որպես հետագա քայլ դիտարկվում է մոդելի իրականացումը ռազմական խնդիրների համար, այդ թվում՝ տվյալների հավաքագրում, նկարագրված դժվարությունները հաղթահարելու ուղիների հայտնաբերում և նեյրոնային ցանցերի միջոցով ռազմական միավորների ուսուցում:

Առանցքային բառեր. նեյրոնային ցանցեր, պատկերի ճանաչում, օբյեկտի հայտնաբերում, սիստեմիկ դասակարգիչներ, ալգորիթմներ:

Н.П. АКОПЯН

СИСТЕМА ПЕРЕВОДА ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИМВОЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДЛЯ КОМБИНАТОРНЫХ ЗАДАЧ ЗАЩИТЫ И КОНКУРЕНЦИИ

Предложены методы преобразования естественных представлений ситуаций в символьное представление Solver-a. Алгоритмы используют нейронные сети для распознавания/обнаружения объектов и описаны для определенной задачи класса RGT - шахмат. Первый алгоритм включает распознавание шахматных фигур, второй - обнаружение шахматных фигур по изображению и нахождение доски по ним. Обсуждаемые модели интегрированы с Solver18.

Описаны возможности применения полученных решений в военных задачах (battlefield problem) и перечислены некоторые трудности, связанные с интерпретацией данной задачи полученными решениями. В качестве следующих шагов рассматривается реализация модели для проблемы Battle Field, включая сбор данных, поиск путей решения описанных трудностей и обучение посредством нейронных сетей.

Ключевые слова: нейронные сети, распознавание изображения, обнаружение объектов, системные классификаторы, алгоритмы.

V.SH. MELIKYAN, S.A. HARUTYUNYAN, K.H. SAFARYAN,
M.V. BAZIKYAN

IMPLEMENTATION OF D FLIP-FLOP FOR ULTRA-LOW POWER SYSTEMS

In this article a new circuit technique to reduce the dynamic mode power of the D Flip-Flop is proposed. An enhancement over well-known Flip-Flop circuit is presented to reduce the number of transistors and hence to reduce the power consumption. The circuit is implemented and tested in SAED32nm library. An example of the circuit usage and method efficiency is provided in this paper.

Keywords: low power; dynamic power; d flip-flop; pipelining.

Introduction. Modern IC circuits require both Low-power and at the same time high-speed solutions. The performance of the circuit is always determined by timing elements such as latches and flip-flops, thus even a small improvement in the flip-flop design may have a huge impact on the design. Timing constraints and power usage are the main concerns that IC design faces nowadays. Due to the robustness and tolerance under the deterioration of operating conditions, the conventional D flip-flop (CDFF) [1] is widely used as a digital standard cell, notwithstanding the more power dissipation.

Many efforts have been made to enhance the DFF performance. A sense-amplifier based flip-flop (SAFF), which can employ reduced clock-swing techniques, is proposed for low power achievement [1]. Based on the conventional SAFF, many improved schemes have been presented in [2-6].

It is also well-known that the DFF design proposes [3] an N-C2MOS output latch to reduce the transition delay. And New SAFF is reported in [5] with better power-delay-product (PDP) performance than that of other published SAFFs, but it will cost much more.

A semi - dynamic flip-flop (SDFF) and hybrid latch flip-flop (HLFF) are known as fast flip-flops, and yet more power dissipation is induced because of the redundant node transitions [7].

Low swing clock double-edge triggered flip-flop [8] and ultra-low power flip-flops for MTCMOS circuits [9] suffer from higher process cost which limited their applications.

In this paper, a master-slave flip-flop which achieves lower power and higher speed by reducing the clock capacitance load and discharge time is proposed.

Traditional D Flip-Flop and its uses. D flip-flop (Delay/Data flip-flop) is one of the basic elements for storing information. It can store one-bit data. Flip-flops, on the other hand, have their content change only either at the rising or falling edge of the enable signal. This enable signal is usually the clock signal itself. It is used in all digital applications where it is required to hold certain data. The basic circuit of D Flip-Flop is presented in Fig 1.

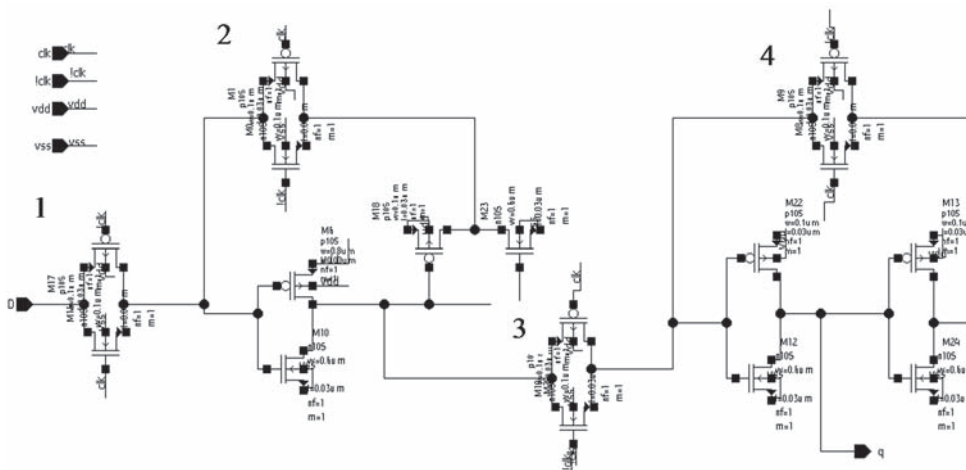


Fig. 1. Traditional CMOS DFF

The circuit has 4 Transmission Gates and 4 Inverters. Transmission Gates are required to make the master slave logic possible. They operate in a way that the entire logic of the circuit is divided into two parts and one of them is always “closed”. Two stages are Sample and Hold.

In Fig 1, TG gates 1 and 3 operate with the same clock edges while 2 and 4 operate with an opposite edge. Let’s assume that the clock signal has logic 1, in that case TG gates 1 and 3 are open and data are pulled into the circuit. When the clock triggers, TG gates also Trigger, resulting in closing the TG 1 and 3 and opening the 2 and 4 TGs. This kind of architecture is used to prevent the metastable value from passing through the flop to the output of the circuit. This is a traditional CMOS trigger circuit. The circuit also provides the inverse of the actual output signal named QN, but in some applications it is not used remaining as a floating port. That is the exploit that the proposed circuit is taking advantage of.

Two inverters inside the single stage of DFF are used as a memory cell. It is also used to provide both straight and inversed outputs in the output stage. But as mentioned above, output is not always used. The inverter uses both PMOS and NMOS transistors to make sure that the output swing is the biggest possible. Sometimes that is not required.

The proposed circuit is built, considering that internal signals may have a lower voltage than outputs. NMOS transistors of the 2nd inverters have been removed in the proposed circuit. That does not have an impact on the cell functionality. Doing this has a disadvantage that the inversed output of the circuit losses in full swing and has a swing of V_{dd} to $V_{dd}-V_{th}$. In the path of those signals there are full inverters which fix the swing decrement issue. Hence, it does not affect the circuit functionality. The proposed circuit is shown in Fig 2.

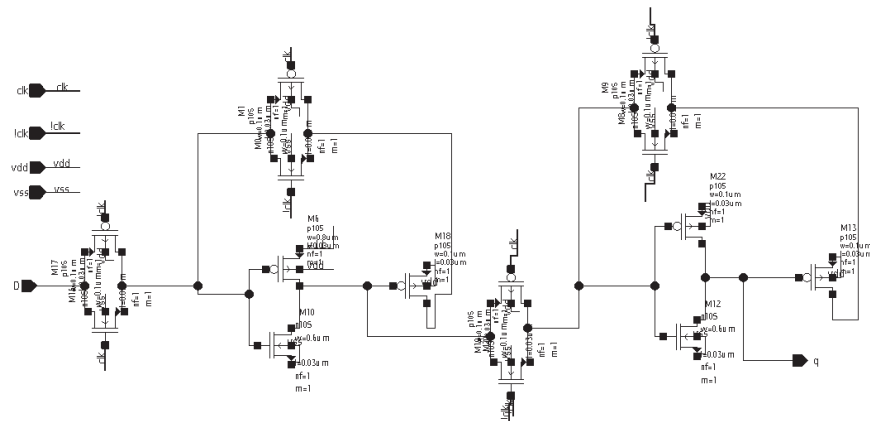


Fig. 2. Proposed DFF circuit

The digital design is carried out by Electronic design automation (EDA) tools. Hence there is no control over what kind of cells the tools will use to create the logic, that is why, libraries include many cells of the same cell. DFF has many variations, including DFFs with only a straight output. The proposed circuit may be used as a low power version of such a cell.

Another application that single output DFFs are used in is Pipelining. Pipelining is a well-known method to fix timing violations. The idea of Pipelining is to split the combo logic into two parts. Put off the correct output by one cycle but make the circuit operate at a higher frequency. Fig. 3 illustrates the idea of Pipelining.

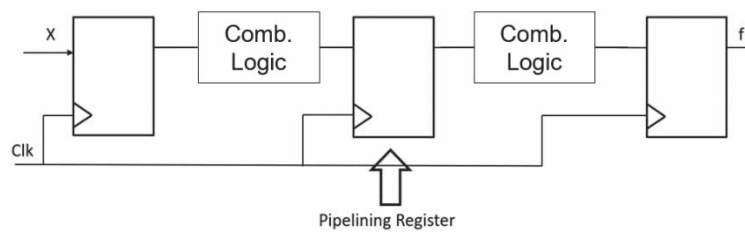


Fig. 3. Pipelining picture

Measurement Results. The DFF circuit has been simulated with SAED 32 nm technology using Hspice[11]. The results of the simulation for traditional and proposed DFFs are illustrated in Fig. 4 and Fig. 5.

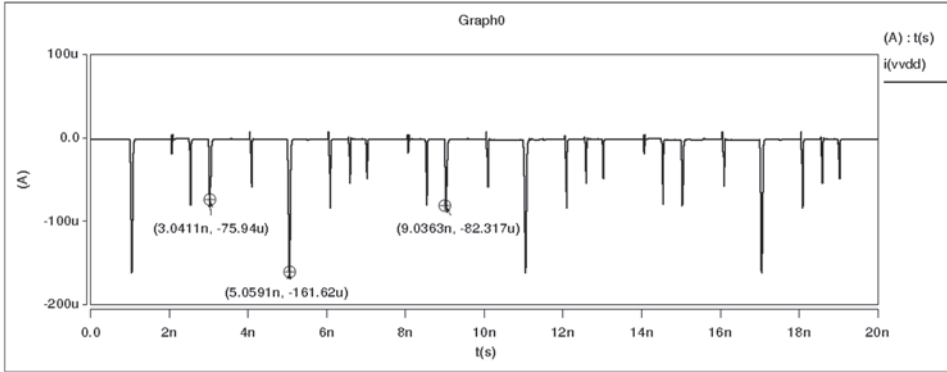


Fig. 4. Simulation Results of the Traditional DFF

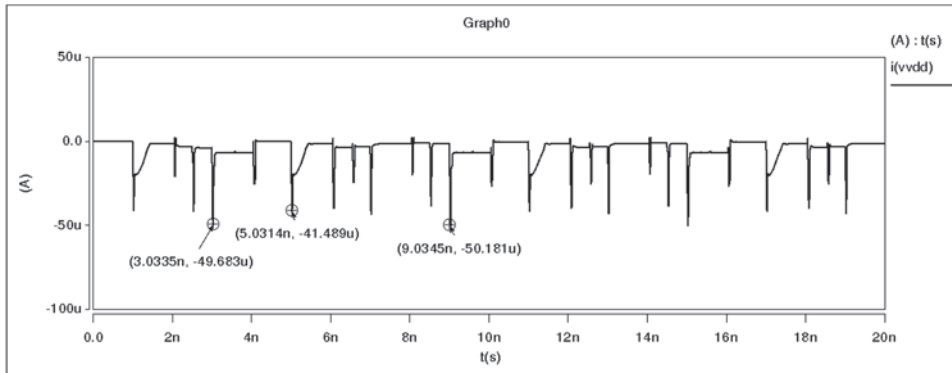


Fig. 5. Simulation Results of Proposed DFF

To test the circuit efficiency in Pipelining, an 8-bit logic has been designed. Although there are no cells between the flops, this illustrates the real pipelining technique that is used in production. It is shown in Fig. 6.

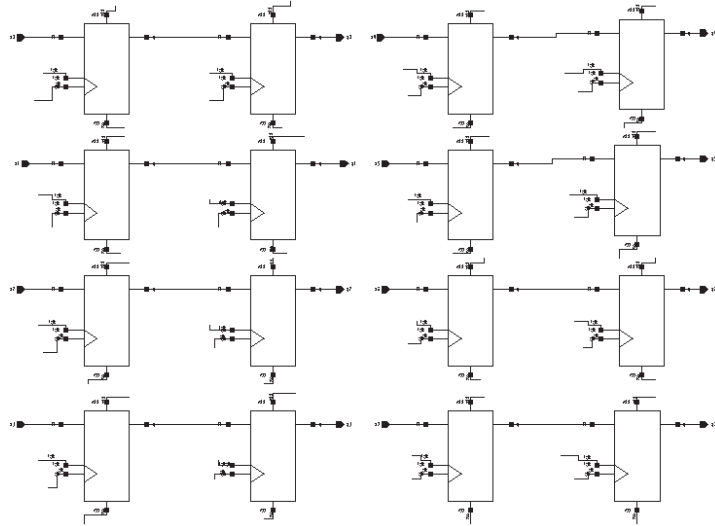


Fig. 6. 8-bit Register Pipelined by 1 stage

The simulation result for the Pipeline circuit with Traditional DFF and the Proposed one are shown in Fig. 7 and Fig. 8.

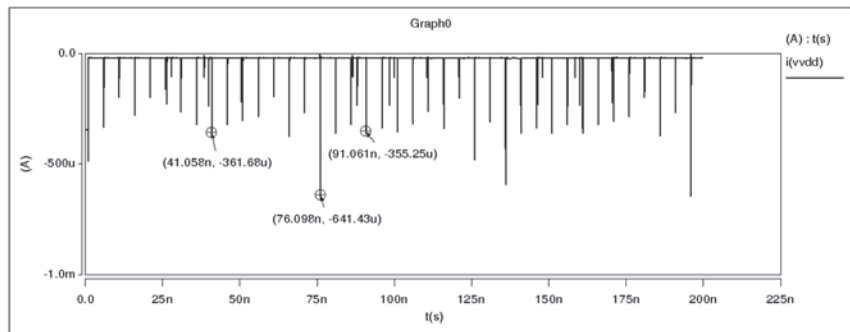


Fig. 7. Simulation Results of the Pipeline circuit with the Traditional DFF

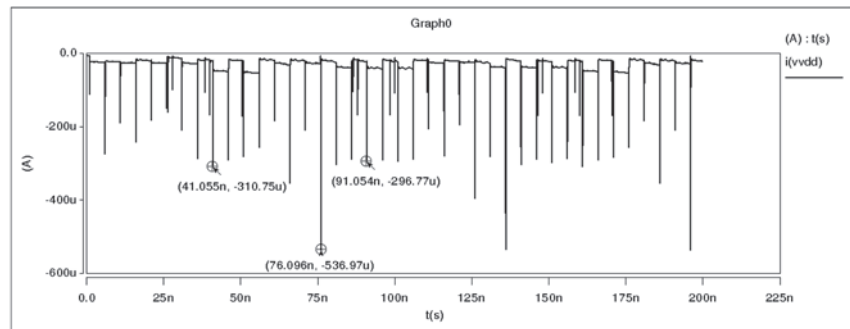


Fig. 8. Simulation Results of the Pipeline circuit with the Proposed DFF

A final comparison has been made between the proposed circuit and the traditional DFF in the face of the area and power parameters. It is shown in the table.

Table

Comparison of the Proposed circuit and the traditional DFF

	Traditional (μW)	Proposed (μW)
D flip Flop	161,62	41,489
8-bit bus Pipelined 1 stage	641,43	489,79

Conclusion. An improved DFF circuit has been presented. The number of components in the circuit is decreased, resulting in lower power consumption. The circuit has been tested separately both in a real-world application and in cases of the proposed circuit. The proposed circuit had an advantage in power consumption. The disadvantage of the design is that it limits the cells' functionality to only single output type, or the implementer should take care of fixing the voltage value of the Inversed output before usage. As a result of such implementation, power consumption has been reduced by up to 20%. This circuit may be used in other DFF heavy applications.

REFERENCES

1. **Kawaguchi H., and Sakurai T.** A reduced clock-swing flip-flop (RCSFF) for 63% power reduction //IEEE Journal of Solid-State Circuits. - May 1998.- Vol. 33, no.5. - P. 807-811.
2. **Zhang Y., Yang H., and Wang H.** Low clock-swing conditional recharge flip-flop for more than 30% power reduction //Electron. Lett. - Apr. 2001. - Vol.36, no.9. -P. 785-786.
3. **Kim J.C., Jang Y.C., and Park H.J.** CMOS sense amplifier-based flipflop with two N-C2MOS output latches //Electron. Lett. - Mar. 2000. - Vol.36, no.6. -P. 498-500.
4. Improved sense-amplifier-based flip-flop: design and measurements / **B. Nikolic, V.G. Oklobdzija, et al** //IEEE Journal of Solid-State Circuits. - June 2000. - Vol.35, no.11. -P. 876-884.
5. **Zhang H., and Mazumder P.** Design of a new sense amplifier flip-flop with improved power-delay-product //IEEE International Symposium on Circuits and Systems. - 23-26 May 2005. - Vol.2. -P. 1262-1265.
6. **Strollo A.G.M., DeCaro D., Napoli E., and Petra N.A.** Novel Highspeed Sense-Amplifier-Based Flip-Flop //IEEE Trans. on VLSI systems. - Nov. 2005. - Vol.13, no.11. -P. 1266-1274.
7. **Zhao P., Tarek K.D., and Magdy A.B.** High-Performance and Low Power Conditional Discharge Flip-Flop //IEEE Trans. on VLSI systems. - May 2004. - Vol.12, no.5. -P. 477-483.

8. **Kim C., and Kang S.M.** A Low-swing Clock Double Edge Triggered Flip-Flop //IEEE Journal of Solid-State Circuits. - May 2002. - Vol.37, no.5. –P. 648-652.
9. **Levacq D., Dessard V., and Flandre D.** Ultra-low power flip-flops for MTCMOS circuits //IEEE International Symposium on Circuits and Systems; 2005 (ISCAS 2005). -23-26 May 2005. - Vol. 5. –P. 4681-4684.
10. URL:https://www.studytonight.com/computer-architecture/pipelining(access date: 08.04.2019).
11. Hspice Application Manual, Synopsys Inc. – 2018. -878p.

National Polytechnic University of Armenia. Material is received 11.04.2019.

**Վ.Շ. ՄԵԼԻՔՅԱՆ, Ս.Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Կ.Հ. ՍԱՖԱՐՅԱՆ, Մ.Վ. ԲԱԶԻԿՅԱՆ
ԳԵՐՑԱԾՐ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՄԲ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐՈՒՄ Ը ՏՐԻԳԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Առաջարկվում է նոր սխեմատիկ մեթոդ՝ Ը տրիգերի դինամիկ ռեժիմում ծախսած հզորության նվազարկման համար: Հայտնի Ը տրիգերի սխեմայի բարելավումը թույլ է տալիս նվազեցնել տրանզիստրների քանակը, արդյունքում՝ նաև հզորության ծախսը: Սխեման մշակված և ստուգված է ՍԱՌԻԴ 32 *նմ* տեխնոլոգիայով: Հոդվածում ներկայացված է նաև սխեմայի կիրառման և մեթոդի արդյունավետության օրինակ:

Առանցքային բառեր. ցածր էներգասպառում, դինամիկ հզորություն, Ը տրիգեր, կոնվեյեր:

**В.Ш. МЕЛИКЯН, С.А. АРУТЮНЯН, К.Г. САФАРЯН, М.В. БАЗИКЯН
РАЗРАБОТКА Д ТРИГГЕРА ДЛЯ СИСТЕМ СО СВЕРХНИЗКИМ
ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ**

Предложена новая схема для снижения мощности динамического режима Ը триггера. Улучшение известной схемы Ը триггера позволяет сократить количество транзисторов и, следовательно, снизить используемую мощность. Схема реализована и протестирована с использованием библиотеки SAED 32 *нм*. В статье также представлен пример использования схемы и показана эффективность метода.

Ключевые слова: низкая мощность, динамическая мощность, Ը триггер, конвейеризация.

Վ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Տ.Հ. ՀՈՎԱԿԻՄՅԱՆ, Դ.Գ. ՄԱՅԻԼՅԱՆ, Հ.Է. ՍՈՂՈՅԱՆ,
Գ.Հ. ՄԱՐՏՈՅԱՆ, Ա.Պ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

**ԱԿՈՒՍՏԻԿ ԷՄԻՍԻՈՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ԳՐԱՆՑՄԱՆ ԵՎ ՄՇԱԿՄԱՆ
ՀԱՄԱԿԱՐԳ**

Մշակվել է իմպուլսային ակուստիկ էմիսիոն (ԱԷ) ազդանշանների գրանցման, վերլուծության և բնութագրիչ պարամետրերի որոշման համակարգ: Համակարգի փորձարկման նպատակով մշակվել և կիրառվել է երկու տարբեր ԱԷ իմիտատոր: Փորձարկումներով հաստատվել է, որ ստեղծված համակարգը հնարավորություն է տալիս որոշել ԱԷ ազդանշանների բնութագրիչ 8 պարամետրերը: Համակարգը կարող է օգտագործվել փորձարարական հետազոտությունների համար, մասնավորապես՝ մետաղի վիճակի չքայքայող ստուգման մեթոդի մշակման աշխատանքներում:

Առանցքային բառեր. ԱԷԿ, ակուստիկ էմիսիա, Հսյու-Նիլսենի մեթոդ, ԱԷ ազդանշանի բնութագրիչ պարամետրեր, պիեզոէլեկտրական ձևափոխիչ, չքայքայող ստուգում:

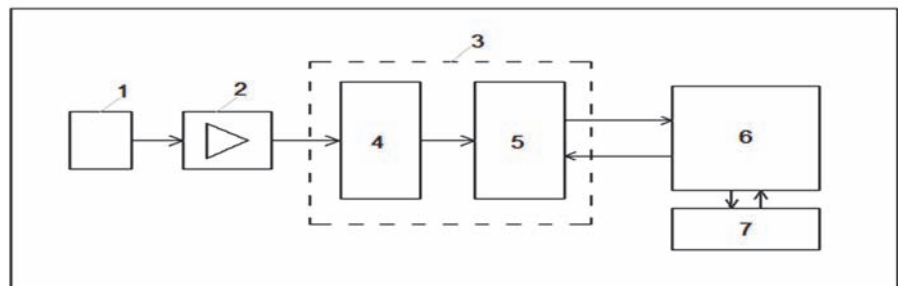
Ներածություն: Էներգետիկայի ոլորտի արդյունաբերական օբյեկտներում՝ ատոմակայաններում, ջերմակայաններում, գազամատակարարման ցանցում և մյուս կարևոր նշանակության օբյեկտներում շահագործվող սարքավորումների և մետաղական կոնստրուկցիաների նյութում առաջացող արատների հայտնաբերումը, տեղայնացումը և զարգացման դինամիկայի ուսումնասիրությունը արդիական հիմնախնդիրներից են: Այդ ուղղությամբ ԱԷ երևույթի օգտագործման հիման վրա մատչելի և արդյունավետ ծրագրատեխնիկական միջոցների ստեղծման աշխատանքները համարվում են կարևոր և հեռանկարային՝ սարքավորումների մետաղի անընդհատության հսկման և, հետևաբար, դրանց անվտանգ շահագործման տեսանկյունից:

Ակուստիկ էմիսիան ներկայացնում է պինդ մարմնի որևէ լոկալ տիրույթում մեխանիկական լարումների բաշխվածության կտրուկ խախտման հետևանքով լարման ալիքների առաքման երևույթը: Առաքվող ալիքները առաջ են բերում մարմնի մակերևույթի տեղաշարժեր, որոնք կարող են գրանցվել ԱԷ ձևափոխիչի միջոցով: ԱԷ սկզբնաղբյուրներ են բյուրեղային ցանցի դիսլոկացիաները, որոնց կոլեկտիվ տեղաշարժերը կարող են առաջ բերել միկրոճաքեր, իսկ դրանց հետագա զարգացումը կվերածվի ճաքերի [1]:

Մետաղի վիճակի չքայքայող ստուգման ԱԷ ժամանակակից մեթոդների մշակման համար որոշիչ են ծրագրատեխնիկական համակարգերը: Դրանք ան-

հրաժեշտ են ԱԷ էլեկտրական ազդանշանների անընդհատ գրանցման, թվայնացման և բնութագրիչ պարամետրերի ստացման համար: ԱԷ իմպուլսի գրանցման և մշակման թվային համակարգերի առավելություններն են՝ արագագործությունը, բազմաֆունկցիոնալությունը, փոքր չափերը և համակարգչային ծրագրային միջոցների կիրառման հնարավորությունը [2-5]: Համակարգչային ծրագրերը հնարավորություն են տալիս որոշելու իմպուլսային ԱԷ ազդանշանների բնութագրիչ պարամետրերը, որոնք պարունակում են կարևոր ինֆորմացիա ԱԷ ազդանշանների աղբյուրների ֆիզիկական բնույթի վերաբերյալ: Ներկայումս մետաղների վիճակի ստուգման ԱԷ մեթոդի հիմնախնդիրն է արատների և ԱԷ ազդանշանների պարամետրերի միջև եղած քանակական կապի բացահայտումը: Նշված խնդրի ուղղությամբ ուսումնասիրությունների նպատակով «Հայատոմ» ԳՀԻ ՓԲԸ-ում ստեղծվել է ԱԷ ազդանշանների գրանցման և մշակման համակարգ:

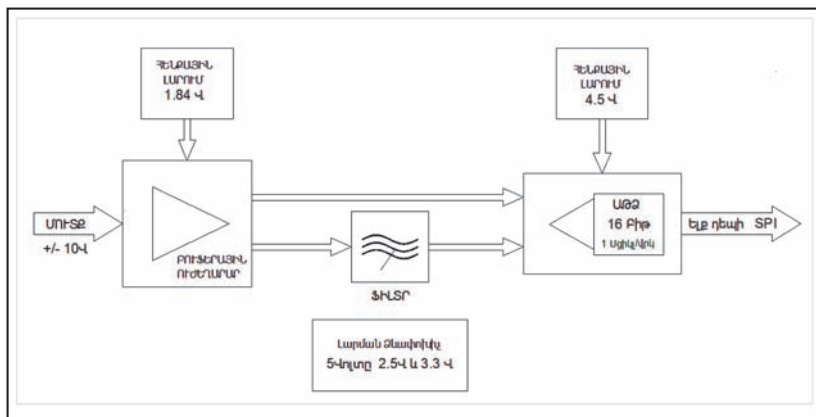
Համակարգի նկարագրությունը: Իմպուլսի ԱԷ ազդանշանների բնութագրերի հետազոտման նպատակով մշակված ծրագրատեխնիկական համակարգի ընդհանուր ֆունկցիոնալ սխեման ներկայացված է նկ.1-ում: Համակարգը բաղկացած է 30...300 կՀց հաճախությունների տիրույթում ակուստիկ ազդանշանների պիեզոէլեկտրական ձևափոխիչից, էլեկտրական ազդանշանների նախնական ուժեղարարից, ազդանշանների գրանցման և մշակման բլոկից, որը ներառում է էլեկտրական ազդանշանների ուժեղացման, ֆիլտրման, անալոգաթվային ձևափոխման (ԱԹՁ) և համակարգչի հետ կապի ապահովման ինտերֆեյսային մոդուլները:



Նկ.1. Ծրագրատեխնիկական սարքի ֆունկցիոնալ սխեման. 1-ԱԷ ազդանշանների ձևափոխիչ, 2- նախնական ուժեղարար, 3- իմպուլսային ազդանշանների գրանցման և մշակման բլոկ, 4- ազդանշանների ուժեղացման, ֆիլտրման և անալոգաթվային ձևափոխման մոդուլ, 5- թվայնացված ԱԷ ազդանշանների համակարգչի հետ կապի ապահովման ինտերֆեյսային մոդուլ, 6- համակարգիչ, 7- համակարգչային ծրագիր

Ազդանշանների ուժեղացման, ֆիլտրման և ԱԹՁ մոդուլի ֆունկցիոնալ սխեման ներկայացված է նկ.2-ում: ԱԹՁ-ի սխեման հավաքված է Analog Device ֆիրմայի AD7983 հաջորդական մոտարկման (SAR) ձևափոխիչի հիմքի վրա: Մուտքային ազդանշանի բուֆերացման համար օգտագործվել է AD8615 օպերացիոն

ուժեղարարը՝ 5 Վ լարման միաբևեռ սնուցմամբ: Երկբևեռ ազդանշանի ձևափոխման նպատակով օպերացիոն ուժեղարարի դրական մուտքին տրվել է շեղման $U_2 = 1,84$ Վ հաստատուն լարում, իսկ ուժեղացման գործակիցի համար ընտրվել է 0,224 արժեքը: Մուտքային լարման լայնույթի լրիվ բացվածքի $U_F = 20$ Վ արժեքի դեպքում ելքային լարումը կազմում է 4,5 Վ: Դա նշանակում է, որ օպերացիոն ուժեղարարի մուտքին -10 Վ լարման կիրառման դեպքում ելքային լարումը հավասար է զրոյի, իսկ մուտքային +10 Վ լարման դեպքում՝ 4,5 Վ: Մխեմայի աշխատանքի համար անհրաժեշտ հենքային 1,84 Վ լարման ձևավորման համար օգտագործվել է ADR391 գծային կարգավորիչը՝ մուտքի 2,5 Վ լարման և լարման ռեզիստորին (1:2,8 կՕՄ) բաժանարարի կիրառմամբ: Հաշվի առնելով, որ ԱԹՁ-ի հենքային լարումը կազմում է 4,5 Վ, նշված գծային կարգավորիչից 2,5 Վ լարումը AD8615 օպերացիոն ուժեղարարի միջոցով ուժեղացվում է մինչև պահանջվող մակարդակը: Ստեղծված ԱԹՁ-ն ունի հետևյալ տեխնիկական տվյալները. տարրալուծումը՝ 16 բիթ, դիսկրետացման հաճախությունը՝ 106 ճիկ/վրկ, հաստատուն հոսանքի սնուցման լարումը՝ 2,5 Վ, սպառման առավելագույն հոսանքը՝ 10 մԱ: Մուտքային բուֆերացված ազդանշանը միակցիչի միջոցով տրվում է ԱԹՁ-ի մուտքին: Բլոկում օգտագործվող երեք ֆիլտրերը մշակվել են 50...300 կՀց հաճախային տիրույթի համար՝ համապատասխանաբար 10, 50 և 100 ուժեղացման գործակիցներով:

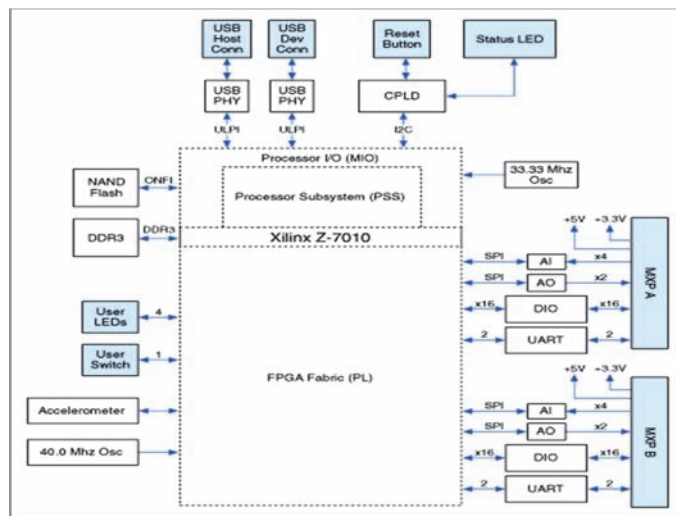


Նկ. 2. Ինպուլսային ազդանշանների գրանցման և մշակման բլոկ - սխեման

Բլոկի միջոցով թվայնացված ազդանշանը SPI հաջորդական ինտերֆեյսի միջոցով կապվում է myRIO-1950 ինտերֆեյսային մոդուլին: ԱԹՁ-ից ստացվող հաջորդական կոդը տրվում է ծրագրավորվող տրամաբանական ինտեգրալ սխեմայի մուտքերին: Մխեմայում տեղի է ունենում հաջորդական կոդի ձևափոխում 16-ական զուգահեռ կոդի և փոխանցում ինտերֆեյսային մոդուլի վերին մակարդակ՝

DMA1 հիշողության սարքի հետ ուղիղ կապի միջոցով: Ինտեգրալ սխեմայում կատարվում է ազդանշանի մեծության համեմատություն շեմային արժեքի հետ: Շեմային արժեքը գերազանցող ազդանշանի առկայության պարագայում գործարկվում է տրիգերը, և ազդանշանի նմուշառված (sampling) արժեքները փոխանցվում են դեպի վերին մակարդակ՝ DMA2 հիշողության սարքի հետ ուղիղ կապի երկրորդ կանալով: Ծրագիրը հնարավորություն է տալիս նաև փոխանցել տրիգերային արժեքներից ցածր արժեքներով ազդանշաններ:

Թվայնացված էլեկտրական ազդանշանների կապը համակարգչի հետ ապահովելու նպատակով օգտագործված է myRIO-1950 բազմաֆունկցիոնալ մոդուլի բլոկ (սխեման բերված է նկ. 3-ում): Մոդուլը բաղկացած է 667 *ՄՀ* տակտային հաճախություն ունեցող ARMContex երկմիջուկային, ծրագրավորվող պրոցեսորից և Xilinx տրամաբանական ինտեգրալ սխեմայից: Մոդուլն ունի նաև առանձին ծրագրավորող չիպ՝ Zynq-7010: Հաջորդական ինտերֆեյսը զուգահեռի փոխակերպելուց հետո ինֆորմացիան համակարգչին է հաղորդվում USB մուտքի միջոցով: ԱՔ իմպուլսային ազդանշանների վերլուծության համակարգչային ծրագիրն աշխատում է LabVIEW միջավայրում:



Նկ. 3. myRIO-1950 ինտերֆեյսային մոդուլի բլոկ - սխեման

Ծրագրի ինտերֆեյսի վրա կան չափվող ազդանշանների ժամանակային ֆունկցիաները ներկայացնող 4 գրաֆիկական պատուհաններ: Առաջին պատուհանը ներկայացնում է սպասման ռեժիմը և արտապատկերում է բլոկի ելքում առկա ԱՔ իմպուլսային ազդանշանի իրական ժամանակային ֆունկցիան՝ ներառյալ ֆոնային բաղադրիչը: Մյուս 3 պատուհաններում ժամանակային ֆունկցիաներն արտապատկերվում են ծրագրային որոշ փոփոխությունների ենթարկվե-

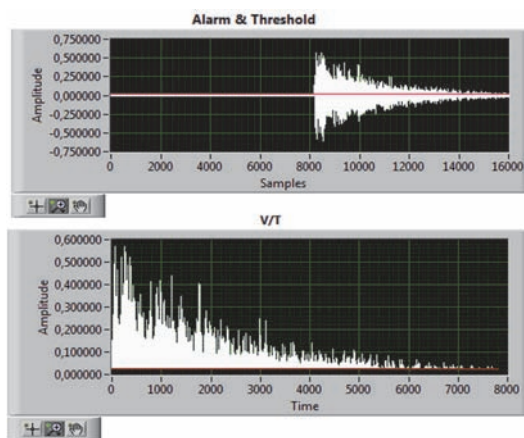
լուց հետո: Այսպես, 2-րդ գրաֆիկական պատուհանը ներկայացնում է ծրագրով սահմանված լարման շեմից բարձր արժեքներին համապատասխանող ժամանակային ֆունկցիան, իսկ 3-րդ պատուհանը՝ իմպուլսը, որի սկիզբը համընկնում է դրա կողմից շեմի առաջին հատման պահից հետո եղած ժամանակային շարքին: Վերջին պատուհանում արտապատկերվում է միայն իմպուլսի շեմից բարձր արժեքներին համապատասխանող տիրույթը: Ծրագիրը հնարավորություն է տալիս ավտոմատ կերպով հաշվարկելու իմպուլսի բնութագրիչ պարամետրերը:

Փորձարկման մեթոդները: Համակարգի աշխատունակությունը փորձարկելու համար կիրառվել են պիեզոէլեկտրական և Հայու-Նիլսենի մեթոդները: Պիեզոէլեկտրական մեթոդի կիրառման համար պատրաստվել է ԱԷ-ի պիեզոէլեկտրական իմիտատոր՝ օգտագործելով կապարի ցիրկոնատ-տիտանատի (LZT) պիեզոկերամիկական տարրը: Փորձարկումների ժամանակ իմիտատորի նիստերին կիրառվել են թռիչքաձև աճող լարումներ, որոնց ամպլիտուդի արժեքները փոփոխվել են 0...200 Վ տիրույթում: Աէ ազդանշանների տարածման միջավայր է ծառայել 930x430x3 մմ չափեր ունեցող չժանգոտվող պողպատից հարթ մակերեսով թիթեղը: Ակուստիկ կոնտակտի ապահովմամբ թիթեղի վրա տեղակայվել են LZT իմիտատորը և դրանից որոշակի հեռավորության վրա՝ Աէ ազդանշանների պիեզոէլեկտրական ընդունիչը, որի էլեկտրական ազդանշանների ուժեղացման համար օգտագործվել են 26 *դԲ* միջին ուժեղացման գործակիցը և 50...300 *կՀց* հաճախությունների թողարկման շերտ ունեցող գործարանային արտադրության ПАЭФ-014 տեսակի էլեկտրական ազդանշանների նախնական ուժեղարարը: Կողմնակի ակուստիկ աղմուկների մեկուսացման նպատակով թիթեղը տեղադրված է հատուկ ռետինե բարձիկների վրա, իսկ էլեկտրական աղմուկների մակարդակի նվազեցման համար կատարվել է թիթեղի հողակցում: Ստուգվել է սարքավորման աշխատանքը Աէ իմպուլսային էլեկտրական տատանումների աղբյուրի հզորության փոփոխման ռեժիմում:

Փորձարկման Հայու-Նիլսենի մեթոդի կիրառման համար ստեղծվել է գրաֆիտե բարակ ձողի կոտրման սկզբունքով աշխատող մեխանիկական իմիտատոր: Գրաֆիտի և միջավայրի հպման կետում, արտաքին ուժի ազդեցության տակ, առաջ է գալիս պինդ մարմնի մակերևույթի լոկալ դեֆորմացիա: Գրաֆիտե ձողի կոտրման պահից սկսած՝ լոկալ դեֆորմացիայի տիրույթը վեր է ածվում իմպուլսային Աէ ալիքների առաքման աղբյուրի, որն իր բնույթով նման է ճաքի առաջացման դեպքում բնական Աէ առաքման աղբյուրին [6,7]: Հայու-Նիլսենի մեթոդում ընդունված են հետևյալ տեխնիկական պարամետրերը. գրաֆիտի կոշտությունը՝ 2 *H*, բացվածքի երկարությունը՝ 2...3 մմ, տրամագիծը՝ 0,5 մմ:

Փորձարկման արդյունքները: Փորձարկման ժամանակ ստուգվել է ծրագրատեխնիկական համակարգի ընդհանուր աշխատունակությունը, այդ թվում՝ Աէ

տվիչի արձագանքը Աէ ազդանշաններին, Աէ տվիչների իմպուլսային էլեկտրական ազդանշանների մշակման բոլորի աշխատունակությունը, համակարգչային ծրագրի աշխատանքը: Պիեզոէլեկտրական իմիտատորով կատարված փորձարկումների ժամանակ պիեզոտարրին կիրառված լարման արժեքը փոփոխվել է 6...72 Վ տիրույթում: Այս ռեժիմում «առաքիչ-ընդունիչ» հեռավորությունը եղել է 900 մմ: Նկ.4-ում պատկերված են իմիտատորի միջոցով ստացված Աէ-ին համապատասխանող իմպուլսային էլեկտրական ազդանշանը և շեմից բարձր գրանցված իմպուլսային ազդանշանի ժամանակային պատկերը:



Նկ. 4. Աէ էլեկտրական իմպուլսային ազդանշանը և այդ ազդանշանի շեմից բարձր տիրույթի ժամանակային պատկերը

Աղ. 1-ում ներկայացված են պիեզոէլեկտրական իմիտատորի լարման փոփոխման ռեժիմում իրականացված փորձարկման արդյունքում ստացված բնութագրիչ պարամետրերը.

- N- իմպուլսով շեմի հատումների թիվը,
- Vmax, - իմպուլսի առավելագույն լայնությունը, Վ,
- T - իմպուլսի տևողությունը շեմից վերև, այսինքն՝ իմպուլսով շեմի առաջին և վերջին հատումների միջև ընկած ժամանակահատվածը, մվ,
- Tmax - ամպլիտուդի առավելագույն արժեքին հասնելու ժամանակահատվածը, մվ,
- RMS, V- լրիվ իմպուլսի միջին քառակուսային արժեքը, Վ,
- RMS (v/t)- շեմից վերև իմպուլսի միջին քառակուսային արժեքը, Վ,
- Int- իմպուլսի ընդհանուր մակերեսը, Վ.մվ,
- Int (v/t)- իմպուլսի շեմից վերև ընկած տիրույթի մակերեսը, Վ.մվ:

Աղ. 1-ում բերված տվյալներից հստակ երևում է RMS արժեքների գծային կախումը իմիտատորին կիրառված լարումից: Աղ. 2-ում բերված են Հայու-Նիլսենի

իմիտատորի առաջացրած իմպուլսային ԱԷ ազդանշանների բնութագրիչ պարամետրերի արժեքները, որոնք ստացվել են 10 չափումների միջինացմամբ: Աղյուսակում ներկայացված արդյունքներից երևում է, որ Հսյու-Նիլսենի իմիտատորի դեպքում ԱԷ ազդանշանների պարամետրերի արժեքները մոտ են պիեզոէլեկտրական իմիտատորի դեպքում ստացված արժեքներին:

Աղյուսակ 1

Պիեզոէլեկտրական իմիտատորի ԱԷ ազդանշանների պարամետրերը

U, Վ	N	V _{max} , Վ	T _{puls} , մվ	T _{max} , մվ	RMS, Վ	RMS (v/t), Վ	Int Վ.մվ	Int (v/t) Վ.մվ
12	596	0,235	6,297	0,035	0,028	0,020	118	21,5
24	958	0,502	7,410	0,034	0,058	0,042	236	70,0
36	1215	0,793	9,026	0,038	0,089	0,062	368	123,1
48	1348	1,003	10,242	0,13	0,119	0,077	484	176
60	1488	1,343	11,143	0,283	0,154	0,101	627	242
72	1583	1,650	11,146	0,173	0,185	0,119	755	291

Աղյուսակ 2

Հսյու-Նիլսենի իմիտատորի ԱԷ ազդանշանների պարամետրերը

N	V _{max} , Վ	T _{puls} , մվ	T _{max} , մվ	RMS, Վ	RMS (v/t), Վ	Int, Վ.մվ
1012	0,701	11,13	0,34	0,096	458,3	128,7

Եզրակացություններ.

1. Մշակված իմպուլսային ԱԷ ազդանշանների գրանցման համակարգը հնարավորություն է տալիս ակուստիկ ազդանշանները թվայնացնել և դրանք վերլուծել համակարգչային ծրագրով:

2. Ստեղծված համակարգի միջոցով կարելի է ստանալ ԱԷ իմպուլսային ազդանշանների բնութագրիչ հիմնական պարամետրերը:

3. Համակարգը կարող է օգտագործվել պինդ մարմնում դեֆորմացիաների արդյունքում առաջացող ԱԷ ազդանշանների հետազոտման համար:

Աշխատանքն իրականացվել է ՀՀ ԿԳՆ գիտության կոմիտեի ֆինանսավորմամբ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Грешников В.А., Дробот Ю.Б.** Акустическая эмиссия. - М.: Изд-во Стандартов, 1976. - 276 с.
2. **Одноколыцев А.В., Власов А.И., Руткевич А.В.** Система неразрушающего контроля на основе явления акустической эмиссии // Инженерный вестник. - 2012.- № 08.-С. 1-19.
3. **Beattie Alan G.** Acoustic Emission Non-Destructive Testing of Structures using Source Location Techniques. Sandia National Laboratories report.- Livermore, California, Prepared by Sandia National Laboratories, 2013.- 127 p.

4. Calibration and Laboratory Testing of Computer Measuring System 8AE-PD Dedicated for Analysis of Acoustic Emission Signals Generated by Partial Discharges Within Oil Power Transformers / **F. Witos, G. Szerszeń, Z. Opilski, M. Setkiewicz, et al** // Archives of Acoustics. - 2017. - Vol. 42, No. 2.- P. 297–311.
5. **Rodgers J.M.** Acoustic Emission testing of seam-welded high energy piping systems in fossil power plants // J. Acoustic Emission. - 2007. - Vol. 25.-P. 286-293.
6. **Sause M.G.R.** Investigation of pencil-lead breaks as Acoustic Emission sources // J. Acoustic Emission. - 2011. - Vol. 29.- P. 184-196.
7. **Ranganayakulu S.V., Goud Samrat B., Sastry P.V., Kumar B.R.** Calibration of Acoustic Emission System for Materials Characterization // Universal Journal of Materials Science. - 2015. - Vol. 3(4).-P. 62-69.

Ատոմային էլեկտրակայանների շահագործման հայկական գիտահետազոտական ինստիտուտ ՓԲԸ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 11.03.2019:

**В.Г. ПЕТРОСЯН, Т.О. ОВАКИМЯН, Д.Г. МАИЛЯН, А.Э. СОГОЯН,
Г.Г. МАРТОЯН, А.П. ПЕТРОСЯН**

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Разработана система регистрации, анализа и определения характерных параметров импульсных сигналов акустической эмиссии (АЭ). Для испытания системы разработаны и применены два разных имитатора АЭ. Испытания показали, что созданная система позволяет определить 8 характерных параметров сигналов АЭ. Система может быть применена для экспериментальных исследований, в частности, в работах по разработке метода неразрушающего контроля металла.

Ключевые слова: атомная электростанция (АЭС), акустическая эмиссия, метод Су-Нильсена, характерные параметры сигнала АЭ, пьезоэлектрический преобразователь, неразрушающий контроль.

**V.G. PETROSYAN, T.H. HOVAKIMYAN, D.G. MAYILYAN,
A.E. SOGHOYAN, G.H. MARTOYAN, A.P. PETROSYAN**

AN ACOUSTIC EMISSION SIGNAL REGISTRATION AND ACQUISITION SYSTEM

A system for registration pulse signals of acoustic emission (AE), analysis and determination of the characteristic parameters has been developed. For testing the system, two different AE imitators have been developed and implemented. The testing has shown that the developed system allows to determine 8 characteristic parameters of the AE signals. The system can be implemented for the experimental research, in particular for the development of the non-destructive testing method of the metal.

Keyword.: NPP, acoustic emission, Hsu-Nielsen technique, AE signal characteristic parameters, piezoelectric transducer, non-destructive testing.

Ա.Ռ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

**ԹՎԱՅԻՆ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՏՐԱՄԱԲԱՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՌՈՒՄԸ
ՏԱՐԲԵՐԻ ՏԵՂԱԲԱՇԽՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ**

Առաջարկված է թվային ինտեգրալ սխեմաների (ԻՄ) բլոկների ֆիզիկական կառուցվածքի ավտոմատացված ստացման մեթոդ՝ հիմնված սխեմայի աշխատանքի տրամաբանության հաշվառմամբ ֆիզիկական «փափուկ» բլոկի կառուցման և դրանից «կոշտ» բլոկի ստացման վրա: Ֆիզիկական «փափուկ» բլոկի ստացումը հիմնված է տրամաբանական սխեմայի ռանգավորման վրա: Ֆիզիկական «փափուկ» բլոկից «կոշտին» անցման նպատակով կիրառվել է տարրերի վերատեղաբաշխման նոր մեթոդ՝ հիմնված բարիկենտրոնային մոդիֆիկացված ալգորիթմի վրա: Մշակվել են բարիկենտրոնային ալգորիթմի կիրառմամբ ֆիզիկական «փափուկ» բլոկից «կոշտ» բլոկի կառուցման ալգորիթմ և համապատասխան ծրագրային իրագործում: Արդյունքները ցույց են տվել առաջարկված մեթոդի արդյունավետությունը՝ ֆիզիկական նախագծման փուլում սխեմայի աշխատանքի տրամաբանության հաշվառման տեսանկյունից:

Առանցքային բառեր. ինտեգրալ սխեմա, ֆիզիկական նախագծում, բարիկենտրոնային ալգորիթմ, «կոշտ» բլոկ:

Ներածություն: Միկրոէլեկտրոնային տեխնոլոգիայի զարգացման հետ մեկտեղ՝ աճում է ԻՄ-երի ֆիզիկական նախագծման փուլում այնպիսի ֆիզիկական կառուցվածքների ստացումը, որոնք հաշվի կառնեն սխեմատեխնիկական առանձնահատկությունները և կբավարարեն սխեմային ներկայացվող ֆունկցիոնալ-տրամաբանական պահանջները: Մրա կարևորությունը պայմանավորված է այն հանգամանքով, որ ժամանակակից ԻՄ-երի միջմիացումներում հապաղումները գերակայում են տրանզիստորների հապաղումներին և զգալիորեն ազդում են սխեմայի աշխատանքի վրա [1,2]: ԻՄ-ում տեղեկատվության մշակման ցիկլի ժամանակը ձևավորվում է սխեմայի տարրերում և միջմիացումներում հապաղումներից: Եթե տարրերի հապաղումները հայտնի են դառնում սխեմատեխնիկական նախագծման փուլում, ապա միջմիացումներում հապաղումները որոշվում են միայն ֆիզիկական նախագծման արդյունքում, այսինքն՝ ծրագծումից հետո: Սակայն, հաշվի առնելով, որ ծրագծման արդյունքները զգալիորեն կախված են տարրերի տեղաբաշխումից, ակնհայտ է դառնում տեղաբաշխման փուլում ազդանշանի հապաղումների հաշառման կարևորությունը:

Տարրերի տեղաբաշխման ժամանակ միջմիացումներում հապաղումների հաշվառման խնդրի լուծումը հիմնված է սխեմայի մուտք-էլք ուղիների ժամանա-

կային վերլուծության և ժամանակով ուղղորդված տեղաբաշխման մեթոդի կիրառման վրա: Ժամանակով ուղղորդված տեղաբաշխման գոյություն ունեցող մեթոդները կարող են խմբավորվել երկու դասով՝ ուղու վրա հիմնված և շղթայի վրա հիմնված [2-4]:

Ուղու վրա հիմնված մոտեցումը ենթադրում է սխեմայի մուտք-ելք կրիտիկական ուղիների հայտնաբերում և տարրերի այնպիսի վերատեղաբաշխում, որ կրիտիկական ուղիների վրա գտնվող տարրերը տեղաբաշխվեն միմյանց հնարավորինս մոտ: Մա արդյունաբերական ավտոմատացված նախագծման համակարգերում ներկայումս օգտագործվող հիմնական մոտեցումն է: Այս մոտեցման թերությունն այն է, որ սխեմայի որոշիչ ուղիների վրա հապաղումների նվազարկումը հաճախ հանգեցնում է նոր որոշիչ ուղիների առաջացման՝ էլ ավելի մեծ հապաղումներով:

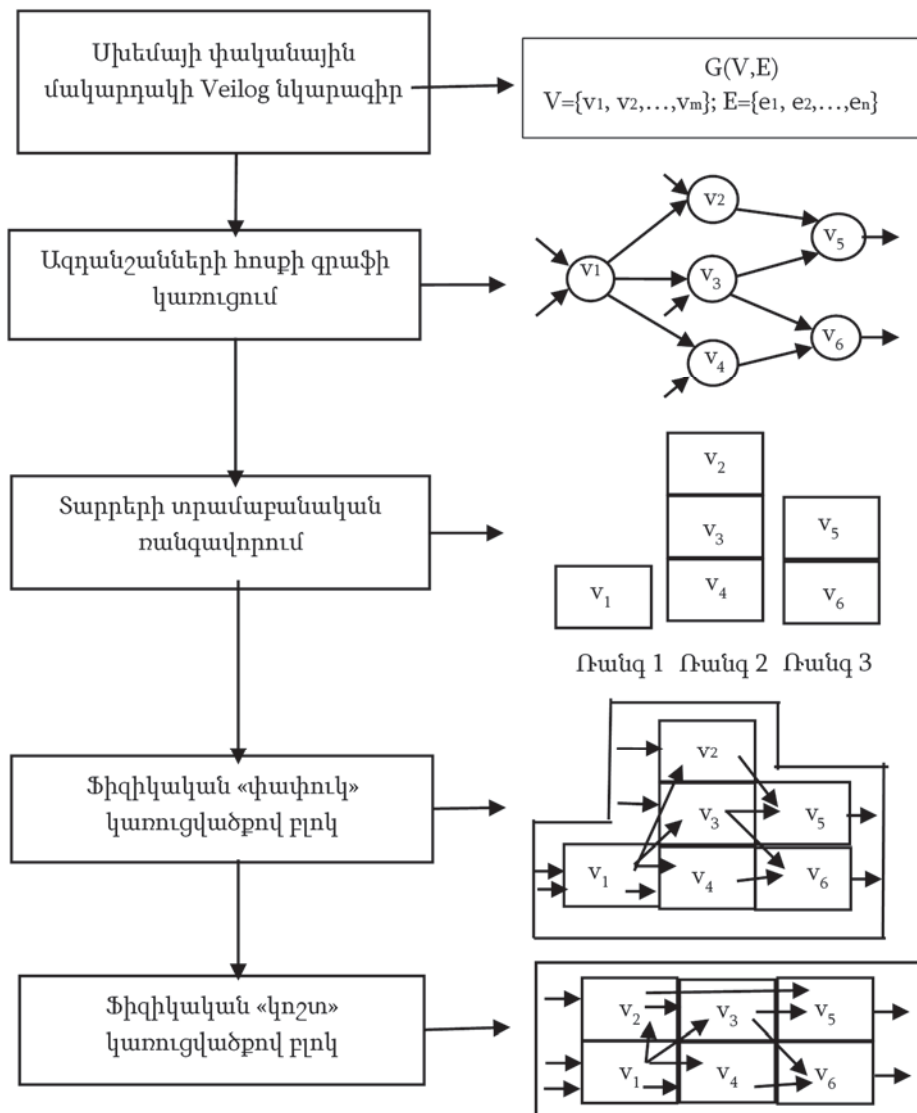
Շղթայի վրա հիմնված մեթոդները ենթադրում են յուրաքանչյուր շղթայի երկարության կառավարում անմիջականորեն տարրերի տեղաբաշխման ընթացքում՝ ըստ սխեմայի արագագործության վրա դրանց ազդեցության չափի: Այս մոտեցման թերությունը տեղաբաշխման փուլում շղթաների երկարությունների կառավարման և ծրագրային իրագործման բարդությունն է:

Նշված թերությունների հաղթահարման նպատակով առաջարկվում է տրամաբանական բլոկների ֆիզիկական կառուցվածքի սինթեզի նոր մոտեցում, որը հիմնված է տրամաբանական սխեմայի ռանգավորման ճանապարհով ստացված ֆիզիկական «փափուկ» բլոկից «կոշտ» բլոկի ձևափոխման վրա և միտված է միջմիացումների երկարությունների և, հետևաբար, դրանցում հապաղումների նվազեցմանը: Նշենք, որ ֆիզիկական «փափուկ» բլոկ ասելով հասկանում ենք երկրաչափական չափսերի առումով չաքամետրացված կառուցվածք, որի տեսքին ներկայացվող սահմանափակումներ չկան, իսկ «կոշտ» բլոկի դեպքում այդ սահմանափակումներն առկա են, և, որպես կանոն, դրանք ուղղանկյան տեսք ունեն: Տարբեր շղթաների ազդեցությունը սխեմայի արագագործության վրա հաշվի առնելու նպատակով առաջարկված է բարիկենտրոնային մոդիֆիկացված ալգորիթմ, որը տարրերի տեղաբաշխման ժամանակ հաշվի է առնում շղթաների կարևորությունը:

Մեթոդի նկարագրությունը: Թվային սխեմաների աշխատանքի տրամաբանության հաշվառմամբ տարրերի տեղաբաշխման առաջարկվող ընթացակարգը բերված է նկ. 1-ում:

Խնդրի լուծման առաջին երեք փուլերը ներառում են տրամաբանական սխեմայում ազդանշանների հոսքի գրաֆի (ԱՀԳ) կառուցման, դրանում բինար որոնման բալանսավորված ծառի կիրառմամբ տրամաբանական տարրերի ռանգավորման և ըստ լայնության փնտրման ալգորիթմի կիրառմամբ ռանգավորված

տրամաբանական սխեմայից ֆիզիկական «փափուկ» բլոկի կառուցման խնդիրները: Խնդրի լուծման համար որպես մուտք ծառայում է տրամաբանական սխեմայի փականային մակարդակի Verilog նկարագիրը, որից էլ ստացվում է ԱՀԳ –ն: Փաստորեն ԱՀԳ –ն տրամաբանական սխեմայի գրաֆային ներկայացումն է՝ $G(E,V)$, որտեղ $V=\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ –տարրերի բազմությունն է, իսկ $E=\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ –ը՝ շղթաների: Խնդրի լուծման այս փուլերը ավելի մանրամասն ներկայացված են [5] –ում:

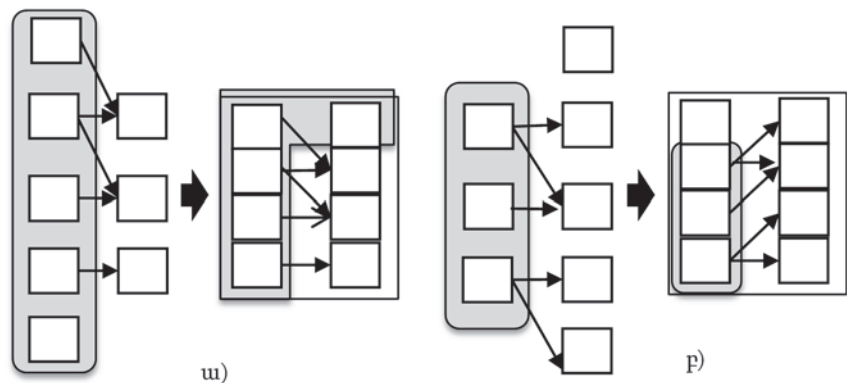


Նկ. 1. Թվային սխեմաների աշխատանքի տրամաբանության հաշվառումը տարրերի տեղաբաշխման ժամանակ

Այս փուլերի արդյունքում ստացվում է «փափուկ» ֆիզիկական կառուցվածքով բլոկ, որն ընդգրկում է սխեմայի ամենամեծ ռանգին հավասար հորիզոնական մակարդակներ, որոնցից յուրաքանչյուրը պարունակում է տվյալ ռանգին համապատասխան տարրերի քանակով ուղղահայաց մակարդակներ:

Հաջորդ փուլում անհրաժեշտ է այնպես ձևափոխել «փափուկ» ֆիզիկական կառուցվածքի բլոկը, որ բավարարվեն բլոկի երկրաչափական չափսերին ներկայացվող սահմանափակումները, որոնք, որպես կանոն, ուղղանկյան x և y կողերի հարաբերության թույլատրելի սահմաններն են՝ $r_{min} \leq y/x \leq r_{max}$, ինչի արդյունքում կձևավորվի «կոշտ» ֆիզիկական կառուցվածքով բլոկը: Այս փուլում կարող է փոխվել ինչպես տարրերի հորիզոնական մակարդակների քանակը, այնպես էլ տարրերի յուրաքանչյուր ուղղահայաց մակարդակի կազմը:

Հորիզոնական մակարդակների ուղղահայաց կոմպլեկտավորումը կատարվում է՝ սկսած առաջին R_i ռանգից մինչև վերջինը: Ընդ որում՝ հերթական i -րդ R_i ռանգի կոմպլեկտավորման ժամանակ կարող է լինել երկու դեպք. կամ R_i -ն ամբողջական չէ, և անհրաժեշտ է տարրերը ավելացնել R_j ռանգից, $j < i$, կամ հակառակը (նկ. 2):



Նկ.2. Հորիզոնական մակարդակների ուղղահայաց կոմպլեկտավորումը, որտեղ ձախ ռանգի տարրերը՝ ա) գերազանցում են, բ) քիչ են աջ ռանգի տարրերից

Որևէ i -րդ տարրը մեկ ռանգից մյուսը տեղափոխելու կարգը հիմնված է տեղափոխվող տարրի կոմպլեկտավորվող ռանգի տարրերի ենթաբազմության հետ առավելագույն և դեռևս չկոմպլեկտավորված ռանգի տարրերի ենթաբազմության հետ նվազագույն կապերի վրա, ինչը համապատասխանում է հետևյալ պայմանին.

$$\beta_i = \min_{i \in R_n} (\sum_{j \in R_n} \lambda_{ij} - \sum_{j \in R_k} \lambda_{ij}), \quad (1)$$

որտեղ V_k և V_n համապատասխանաբար կոմպլեկտավորված և չկոմպլեկտավորված տարրերի բազմություններն են, λ_{ij} -ն՝ i -րդ և j -րդ տարրերը կապող շղթայի

կարևորության գործակիցը: Կարևորության գործակիցը հաշվի է առնում շղթայի ժամանակային պարամետրերը և որոշվում է՝ ելնելով շղթայի ժամանակի պահուստի նկատմամբ հակառակ համեմատականության նկատառումներից [2,6]: Ժամանակային ահմանափակումների ստուգման նպատակով օգտագործվում է շղթաների երկարությունը գնահատելու կիսապարագծային մեթոդը, որը որոշվում է նվազագույն ուղղանկյան տրված շղթայի կոնտակտներն ընդգրկող նվազագույն մակերեսով ուղղանկյան կիսապարագծով [2]: Ռանգավորման հիման վրա տեղաբաշխման ժամանակ կիսապարագծային մեթոդը կասոցացվի տվյալ շղթայի հետ կապված տարրերի առավելագույն և նվազագույն ռանգերի և ուղղահայաց մակարդակների միջև եղած տարբերությունների գումարի հետ:

Ժամանակի սահմանափակումները հաշվի առնելու համար նպատակահարմար է վերանայել տարրերի գծային կարգը՝ յուրաքանչյուր հորիզոնական մակարդակում, շղթաների երկարությունները նվազագույնի հասցնելու համար, հաշվի առնելով դրանց կարևորությունը: Ընդհանուր առմամբ, այս խնդիրը NP բարդության է, և դրա ճշգրիտ լուծումը ենթադրում է բոլոր տարբերակների ամբողջական հաշվարկ, ինչը անընդունելի է: Հայտնի են այս խնդրի արագ լուծման մի շարք մեթոդներ, որոնցից բարիկենտրոնային մեթոդն առանձնանում է իր արագությամբ և օգտագործման հարմարավետությամբ [7]: Այս աշխատանքում առաջարկվում է բարիկենտրոնային մեթոդի մոդիֆիկացված տարբերակ, որը հաշվի է առնում ոչ միայն հարևան մակարդակների տրամաբանական տարրերը կապող շղթաները, այլև շղթաների կարևորության գործակիցները:

Որևէ k -րդ հորիզոնական մակարդակում i -րդ տարրի՝ $v_{ki} \in V$ ուղղահայաց կոորդինատը որոշվում է հետևյալ կերպ՝

$$v_{ki}(y) = \frac{1}{\text{card}(\Omega_k)} \sum_{j \in \Omega_k} \lambda_{kij} v_j(y), \quad (2)$$

որտեղ Ω_k -ն արդեն փոխատեղված տարրերի բազմություն է, իսկ $\text{card}(\Omega_k)$ -ն՝ այդ բազմության հզորությունը:

Տարրերի ուղղահայաց տեղադրման հերթականությունը՝ V_k , որոշակի k -րդ հորիզոնական մակարդակում որոշվում է այդ տարրերի ուղղահայաց կոորդինատների աճման կարգով. $v_{ki}(y_1) \leq v_{ki}(y_2) \leq \dots \leq v_{ki}(y_k)$: Որոշ տարրերի ուղղահայաց կոորդինատների համընկնելու դեպքում ընտրվում է դրանց տեղադրման կամայական կարգը:

Հորիզոնական մակարդակներում տարրերի գծային կարգը վերակազմակերպելու առաջարկվող ալգորիթմի ռազմավարությունը հետևյալն է.

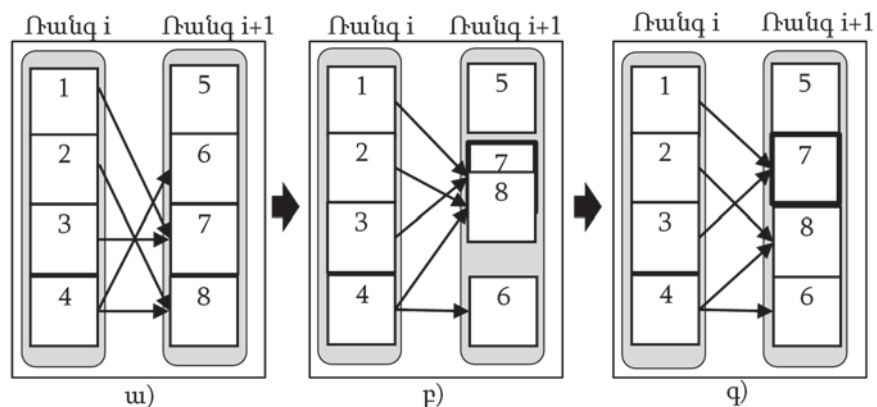
1. Առաջին մակարդակի տարրերի ըստ կապվածության տեղաբաշխումը՝ օգտագործելով հաջորդական տեղաբաշխման ամենապարզ ալգորիթմը ըստ կապվածության [2]:

2. Հաջորդ մակարդակների տարրերի հաջորդական տեղաբաշխումը՝ ըստ դրանց աճման ուղղության: Այս դեպքում որոշ ռանգում տեղաբաշխումը կատարվում է՝ հաշվի առնելով տարրերի կապը միայն նախորդ ռանգերի տարրերի, այսինքն՝ արդեն տեղաբաշխված տարրերի հետ (նկ. 3 ա, բ):

3. Երկրորդ քայլի պարբերական կրկնությունը՝ հաջորդաբար հիերարխիաների կարգերի ավելացման և նվազեցման ուղղություններով, մինչև ժամանակի սահմանափակումների բավարարումը:

Յուրաքանչյուր մակարդակի ներսում տարրերի տեղաբաշխման համար, առաջին հերթին, սահմանվում են բոլոր տարրերի ուղղահայաց կոորդինատները, և հետագայում տարրերի տեղաբաշխումը կատարվում է ըստ կոորդինատների ավելացման: Հավասար կոորդինատների դեպքում տարրերը տեղաբաշխվում են կամայականորեն:

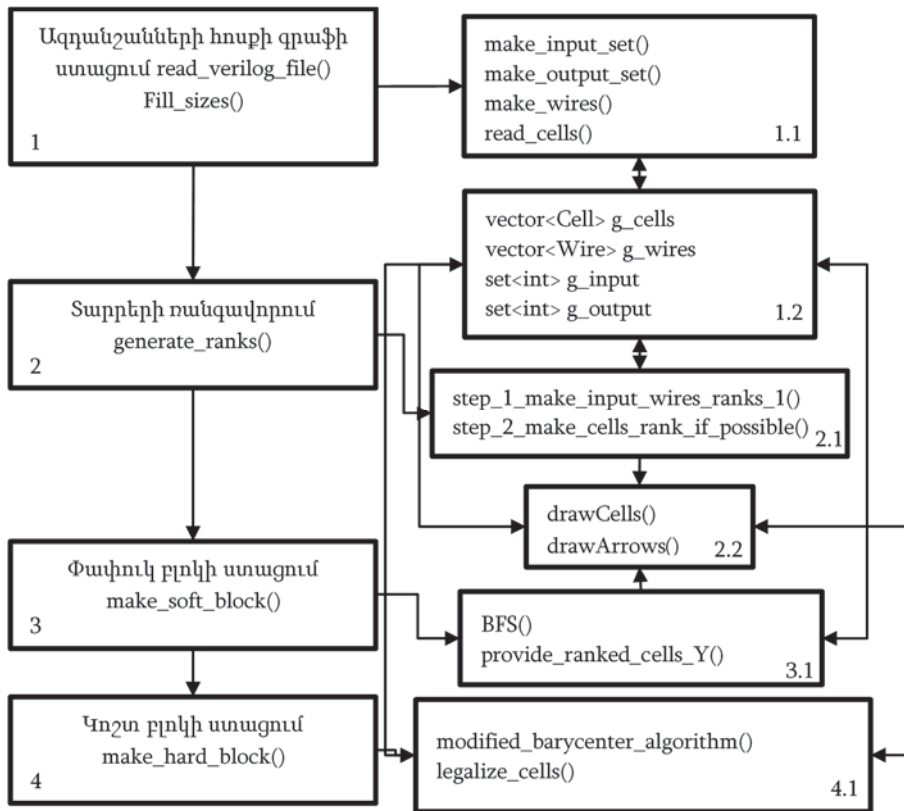
Վերջնական տեղադրումը ենթադրում է տեղաբաշխման արդյունքների լեգալացում՝ հաշվի առնելով նախագծի սահմանափակումները (նկ. 3 բ, գ):



Նկ.3. Հորիզոնական մակարդակներում ուղղահայաց ուղղությամբ տարրերի կոմպլեկտավորումը՝ ա) նախնական վիճակ, բ) մոդիֆիկացված բարիկենտրոնային ալգորիթմի աշխատանքից հետո, գ) արդյունքների լեգալացում

Մեթոդի ծրագրային իրագործումը և արդյունքները: Վերը շարադրված ալգորիթմների հենքի վրա մշակվել է տրամաբանական սխեմայի ֆիզիկական «կոշտ» բլոկի կառուցման ծրագրային միջոց, որի ֆունկցիաները ներկայացված են նկ. 4-ում:

Մշակված ծրագրային գործիքի միջոցով «կոշտ» բլոկի սինթեզի ժամանակի՝ տարրերի քանակից կախվածության հետազոտումը դրսևորել է $O((E+V)\log V)$ բարդություն, ինչից էլ հետևում է առաջարկված մեթոդի բարձր արագագործությունը:



Նկ. 4. Մշակված ծրագրային միջոցի աշխատանքը բնութագրող քայլերի հաջորդականությունը և կիրառված ֆունկցիաները

Ստորև ներկայացված են ֆունկցիաների նշանակությունները.

1. Ազդանշանների հոսքի գրաֆի ստացում (1 բլոկ).

• read_verilog_file() – կարդում է տրված Verilog ֆայլը և կառուցում ԱՀԳ (1.2 բլոկ),

• make_input_set() - մուտքային շղթաների ծառի կառուցում՝ g_input -ի մեջ (1.3 բլոկ),

• make_output_set() - ելքային շղթաների ծառի կառուցում՝ g_output -ի մեջ (1.3 բլոկ),

• make_wires() - բոլոր շղթաների տվյալների կառուցում՝ g_wires զանգվածում (1.3 բլոկ),

• read_cells() - տարրերի տվյալների կառուցում՝ g_cells զանգվածում (1.3 բլոկ), g_gate_name_to_id բինար որոնման բալանսավորված ծառում գրվում են բոլոր շղթաները և դրանց id -երը (նույնականության համարները), որպեսզի ծրագիրը հետագայում հեշտությամբ աշխատի միայն id-երով:

- `fill_sizes()` – բոլոր տարրերին վերագրվում է բարձրություն և երկարություն. `g_cells` զանգվածում կատարվում է տվյալների թարմացում:

2. Տարրերի ռանգավորում (2 բլոկ): Իրականացնում է տարրերի ռանգավորում. որոշակի ալգորիթով, որն էլ ներկայացվում է 3 ֆունկցիաների աշխատանքով (2.1 բլոկ).

- `step_1_make_input_wires_ranks_1()` – բոլոր մուտքային շղթաներին տրվում է 1 ռանգ,

- `step_2_make_cells_rank_if_possible()` – տրված որոշակի պայմանը բավարարելու դեպքում համապատասխան տարրերին վերագրել համապատասխան ռանգ,

- `step_3_break_circle_of_0_rank_cells()` – եթե բոլոր տարրերը դեռ ռանգավորված չեն, հետևաբար՝ գոյություն ունի տարրերի աշխատանքի ցիկլ, կտրել հետադարձ կապը:

3. Փափուկ բլոկի ստացում (3 բլոկ).

- `BFS()` – իրականացնում է ըստ խորության ալգորիթի մոդիֆիկացված տարբերակի հայտնի փնտրում՝ միջմիացումների հատումների քանակի և երկարությունների կրճատման նպատակով, որից հետո `provide_ranked_cells_Y()` ֆունկցիայով տարրերին տրվում է որոշակի Y կոորդինատ (3.1 բլոկ):

4. Կոշտ բլոկի կառուցում (4 բլոկ).

- `modified_barycenter_algorithm()` – իրականացնում է այս աշխատանքում ներկայացված բարիկենտրոնային մոդիֆիկացված ալգորիթը, որի արդյունքում տարրերը ստանում են որոշակի X և Y կոորդինատներ (4.1 բլոկ),

- `legalize_cells()` – այս ֆունկցիան բացառում է տարրերի հատումների քանակը և ստանում է վերջնական տեսքով կոշտ բլոկ (4.1 բլոկ):

Նշված բոլոր քայլերում ծրագիրը ինտենսիվ հարցումներ է անում 1.2 բլոկին և ստանում տվյալների վերաբերյալ ցանկացած ինֆորմացիա: Բոլոր բլոկներում ներկայացված ֆունկցիաները հնարավորություն ունեն ցանկացած պահի գրաֆիկական ինտերֆեյսում արտապատկերելու տվյալ պահին տարրերի և տարրերը իրար կապող շղթաների ընդհանուր գրաֆային տեսքը (2.2 բլոկ):

Մշակված ծրագրային գործիքի արդյունավետության գնահատման համար կատարվել է ISCAS85 շարքի մի շարք թեստային սխեմաների տարրերի տեղաբաշխում [8]: Որպես տարրային հենք օգտագործվել է «Մինոփսիս-Արմենիայում» մշակված SAED32/28 թվային ստանդարտ տարրերի գրադարանը [9]: Տեղաբաշխման արդյունքում որոշիչ շղթաների համար, առավելագույն ժամանակի պահուստով շղթաների համեմատ, ապահովվել է միջինում 45% կարճացում: Տեղաբաշխման արդյունքները համեմատվել են նույն ալգորիթական բարդությունն ունեցող նախնական տեղաբաշխման հաջորդական ալգորիթի և «Մինոփսիս» ընկերության

IC Compiler ծրագրային գործիքի նախնական տեղաբաշխման արդյունքների հետ [6]: Առաջարկվող ալգորիթմի դեպքում որոշիչ շղթաների համար ապահովվում է միջինում 7%, իսկ առավելագույն ժամանակի պահուստով շղթաների համար՝ 35% կարճացում: Միաժամանակ նկատվել է միջմիացումների գումարային երկարության ավելի քան 10% կարճացում:

Եզրակացություն: Առաջարկվել է տրամաբանական բլոկների ֆիզիկական կառուցվածքի սինթեզի նոր մոտեցում, որը հիմնված է տրամաբանական սխեմայի ռանգավորման ճանապարհով ստացված ֆիզիկական «փափուկ» բլոկից «կոշտ» բլոկի ձևափոխման վրա, որն իրագործվել և փորձակվել է թեստային սխեմաների համար: Փորձարկումները ցույց են տվել մեթոդի բարձր արդյունավետությունը՝ արագագործության և միջմիացումների երկարությունների կրճատման և, հետևաբար, դրանցում հապաղումների նվազեցման տեսանկյունից:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS). - More Moore, 2015, https://www.semiconductors.org/clientuploads/Research_Technology/ITRS/2015/5_2015%20ITRS%202.0_More%20Moore.pdf.
2. **Մելիքյան Վ.Շ., Հարությունյան Ա.Գ., Գևորգյան Ա.Ա.** Միկրոէլեկտրոնային սխեմաների ֆիզիկական նախագծման մեթոդներ. Մենագրություն/ ՀՊՃՀ.-Եր.: Ճարտարագետ, 2015. - 240 էջ:
3. **Kahng Andrew B., Lienig Jens, Markov Igor L., Hu Jin.** VLSI Physical Design: From Graph Partitioning to Timing Closure.-Springer, 2011. -310p.
4. **William Martin Jr Halpin.** Timing Driven Placement Through Net Length Constraints. - Proquest, Umi Dissertation Publishing., Charleston SC, United States, 2011.-288p.
5. **Մարտիրոսյան Ա.Ռ.** «Փափուկ» ֆիզիկական կառուցվածքով բլոկների սինթեզը թվային ինտեգրալ սխեմաների տրամաբանական նկարագրությունից // ISSN 0002-306X. ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղ. Տեխն. գիտ. սերիա.- 2018.- Հ. LXXI, N4. – էջ 475-484:
6. **Арутюнян А.Г.** Начальное размещение логических ячеек интегральных схем с учетом важности цепей // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2014: Сборник трудов / Под общ. ред. акад. РАН А.Л. Стемпковского. - М.: ИППМ РАН, 2014. - Часть 1. - С.143-146.
7. **Roberto Tamassia** Handbook Graph Drawing and Visualization. - CRC Press 2013Taylor&Francis Group, Northampton, Massachusetts, USA, 2014.- 852p.
8. ISCAS85 Combinational Benchmark Circuits. <https://filebox.ece.vt.edu/~mhsiao/iscas85.html>.
9. Digital Standard Cell Library.- SAED_EDK32/28 // SYNOPSISYS ARMENIA Educational Department.- Yerevan, 2011. -152 p.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 07.04.2019:

А.Р. МАРТИРОСЯН

**УЧЕТ ЛОГИКИ РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ СХЕМ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ
ЭЛЕМЕНТОВ**

Предложен метод автоматизированного получения физической структуры блоков цифровых интегральных схем. Метод основан на построении физического "мягкого" блока логики работы схемы с учетом логики работы схемы и получении в результате этого "жесткого" блока. Получение физического "мягкого" блока основано на ранжировании логической схемы. С целью перехода от физического "мягкого" блока к "жесткому" применен новый метод переразмещения элементов, основанный на модифицированном алгоритме барицентров. Разработаны алгоритм построения "жесткого" блока из физического "мягкого" блока с использованием алгоритма барицентров и соответствующая программная реализация. Результаты показали эффективность предложенного метода с точки зрения учета логики работы схемы на этапе физического проектирования.

Ключевые слова: интегральная схема, физическое проектирование, алгоритм барицентров, "жесткий" блок.

A.R. MARTIROSYAN

CONSIDERING THE DIGITAL CIRCUIT LOGIC DURING CELL PLACEMENT

A method for automated reception of the physical structure of the digital integrated circuit (IC) units is proposed. The method is based on building a physical "soft" block of the circuit operation logic, taking into account the circuit operation logic, and obtaining from this the "hard" block. Obtaining the physical "soft" block is based on the ranking of the logic circuit. In order to move from a physical "soft" block to a "hard" one, a new method of element re-placement based on a modified barycenter algorithm is applied. An algorithm for constructing a "hard" block from a physical "soft" block, using the barycenter algorithm, and the corresponding software implementation has been developed. The results have shown the efficiency of the proposed method from the point of view of considering the circuit operation logic at the stage of physical design.

Keywords: integrated circuit, physical design, barycenter algorithm, "hard" block.

D.L. HAYRAPETYAN

**VERIFICATION OF THE MEMORY TEST AND DIAGNOSIS FLOW
IMPLEMENTATION IN SOFTWARE POST-SILICON ANALYSIS
AUTOMATION TOOLS**

With rapidly increasing density and capacity of nanoscale memory devices embedded in modern system-on-chips (SoC), new design problems are being introduced, as well as the requirements are strengthened towards test and diagnosis for achieving higher quality and increased yield. This leads to modification of existing and/or development of new memory test, fault detection, localization and classification flows that are being implemented in various software post-silicon analysis automation tools. In this paper, an approach for verification of those tools is proposed.

Keywords: Verification, Memory test, Memory diagnostics, Memory faults, Test pattern.

Introduction. The rapid increase of density and capacity in memory IP cores embedded in modern system-on-chip (SoC) creates new challenges of preserving test and repair cost while also minimizing time-to-market. The on-chip infrastructure IP is proposed in [1] to maximize the test and repair efficiency utilizing the memory design knowledge and providing the analysis on failure data. Considering the increasing complexity of SoC design, it becomes crucial for silicon embedded memory test and repair solutions to keep up with the technology advances in order to consistently provide superior chip quality and yield optimization [2]. Some aspects of implementation of the corresponding solutions for post-silicon analysis automation that extend the mentioned infrastructure to cover challenges of today's designs which are much bigger, faster, hierarchical and sensitive to area, timing and power are considered in the current work.

With the technology shrinking, new types of memory defects and corresponding memory fault models [3] for the memory test have been observed during post-silicon analysis [1]. That posed new challenges in the test and diagnosis of embedded memories of systems-on-chip (SoC) using all-in-one solutions [2, 4]. We follow the approach of task distribution between the hardware (HW) memory built-in self-test (MBIST) engine and software (SW) automation tools adduced in [2], where the management and control of test and diagnosis flow is implemented via SW, while the actual at-speed basic test and diagnosis procedures are performed by the MBIST engine.

The interaction between SW and HW sides of this mature solution is managed via creation of test patterns at the SW side, their application to MBIST engine via standard interfaces [5-7] and analysis of obtained results/chains from the MBIST engine at the SW side. The proposed mature test and diagnosis flow [8] comprises three main phases: fault detection, classification and localization, where each phase requires specific test patterns to be created and analyzed, so that results can be propagated to the next phase preparation step. Specific march test algorithms and march-like test algorithms should be developed and used for each phase for generating the corresponding test patterns, which in their turn, will be passed to the MBIST engine for further at-speed execution.

Since it is crucial to ensure the correctness of diagnosis flow implementation before it is applied to a real SoC, a fault-prone environment for pattern verification is required for modeling the test pattern execution on the MBIST engine using some accurate models of memory faults to be tested by the MBIST engine. It is also essential to estimate the execution run time for being time-efficient and allowing a variety of different scenarios to be quickly passed through the MBIST engine.

The aim of this paper is to build the mentioned environment for test patterns and obtained chain verification.

With the introduction of FinFET technology, new types of memory defects have been observed [9-11]. Test and diagnosis flows designed for faults present in previous designs were not applicable as they were not able to provide the necessary coverage and required modification of detection, classification and localization phases. At the same time, solutions elaborated for current designs will face the same issue in future because of continuous changes in memory designs due to technology shrinkage. A natural demand for prediction of new fault types and modifications of solutions required for the test and diagnosis arose. The issue was addressed with introduction of multidimensional prediction mechanism for memory fault classification [12], that systemizes all known memory faults in periodic manner and gives a view on impending new faults that may appear in memories with new technology nodes. Furthermore, the mechanism offers a generic flow for efficient new march test algorithm generation for the new faults based on a test algorithm template. The use of the mentioned mechanism is added to the generation process of memory fault models for the SW side.

A System Verilog environment [13] is considered as a basis for implementation of the environment for pattern verification. The existing tools [14] are enriched to cover the new requirements above. The application of the enriched tools for generation of several memory faults inherent to modern manufacturing technologies [15] is also considered.

The structure of the paper is as follows: section 1 provides brief information on the approach for building verification environment for test patterns used for post-silicon analysis. Fault model generation and injection flows are outlined in section 2. The verification step for test patterns is defined in section 3 along with the verification step of the output chain analysis of the test and diagnosis flow in section 4. The experimental results are provided in section 5. The use of the approach for the predicted faults is proposed in section 6. Section 7 concludes the paper.

1. An approach for building the verification environment for post-silicon analysis of test patterns. Throughout this paper, we will consider the test patterns used for the test and diagnosis flow described in [8]. Each step of the test and diagnosis flow, when implemented in test automation tools, requires creation of a corresponding test pattern, application of the pattern on the BIST system and the analysis of the obtained chains. The analyzed information is utilized at creating the test patterns in the next step.

However, test pattern creation and chain analysis are fault-prone for implementation. Therefore, they require an adequate environment for being tested and verified before interactions with manufactured SoCs. Since the test pattern generation in each phase of the flow depends on the results of test pattern execution in the previous phase, verification of this flow implementation is essential. The verification environment is constructed on the basis of MBIST register transfer level representation (Fig. 1). The process of building the environment can be divided into 3 parts which will be discussed further, throughout this paper.

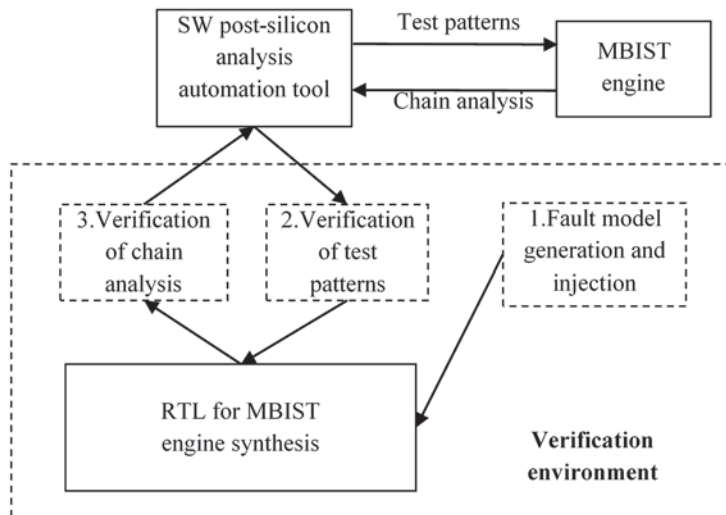


Fig. 1. Verification flow for the software post-silicon analysis automation tool

2. Fault model generation and injection. The fault DFA generation flow [14] was used in this step which consists of the following major steps:

1. Parsing input files and storing the obtained data as separate constructs: fault primitives (FPs) [3], fault injection memory cell addresses, memory configuration file.

2. Generating a fault description table (FDT) for FP (<S/F/R> for single-cell and <S_a: S_v/F/R for coupling faults>). FDT is a table representation of the DFA model, where each row of the table contains information on DFA state and transitions going out from it.

3. Generating the System Verilog code for FDT and including it into the memory test bench, while considering the information provided in point 1.

The fault DFA is intended to model the memory internal faults. It is shown how the fault model is extended by increasing the number of the affected cells and operations in FP [16]. In addition, fault model extension for linked faults that comprise multiple FPs [17] was derived in [18].

2.1. Fault injection. During the inclusion of fault model in RTL, the test bench fault memory cell address must be provided. Since memories generally use words for storage of the information rather than single bits, the memory cell address can be provided via memory word address and the position of the faulty bit in it. Fault models with several memory cells require multiple addresses and bit positions to be specified. Furthermore, memories may consist of multiple banks, thus the bank index must be provided. Finally, as soon as multiple instances of a memory device may be present in the MBIST network, the hierarchical path to a memory must also be provided (Fig. 2).

```
server{
[processor1 [1]]
  MEMORY [1]
    // Address in range: [1023 : 0], Number of Bits = 133

    single cell faults:
    ADDR = 3, BIT = 2, FTYPE = <R0/0/1>
    ADDR = 2, BIT = 1, FTYPE = <0/1/->

    coupling faults:
    ADDRA = 900, BITA = 5, ADDRv = 915, BITV = 2, FTYPE = <1W1;0/1/->

[processor2 [2]]
  MEMORY2 [1]
    // Address in range: [4991 : 0], Number of Bits = 61

  MEMORY2 [2]
    // Address in range: [4991 : 0], Number of Bits = 61
}
```

Fig. 2. A fault injection file example

Another important issue to be considered is that memory address used for fault injection is generally a logical address. Thus, two bits logically preceding one another (within the same word or two words logically neighboring each other), are not necessary neighboring each other inside the memory device. This behavior is determined by the memory address and data scrambling that is usually present in most modern memories [19]. Assuming the data on memory address and data scrambling information is provided, the second address for coupling the faults is calculated by providing the logical address of either aggressor or victim cell, calculating the logical addresses of the neighboring cells (Fig. 3), using the scrambling information and picking the address of the second cell from the list of calculated logical addresses.

1	2	3
8	V	4
7	6	5

Fig. 3. Victim cell V, with potential aggressor cells 1,2,3,4,5,6,7,8

Fault injection or the process of including the DFA fault model in the RTL test bench requires knowledge of memory device pins for addressing, obtaining and shifting in the data, application of read and write operations. This information can be provided with the memory configuration file [14].

3. Verification of test patterns. Since the test patterns command the MBIST to run march test algorithms/march-like adaptive test algorithms on the memory devices, a way to determine if the test pattern was successfully executed is to observe the behavior of the fault model injected into the MBIST.

The fault model is traversable through the transition flags in FDT representation [14]. Each time a transition from a state occurs, the transition flag of current FDT row for corresponding operation is set to 1. After the simulation is over, the resulting FDT is compared with a reference FDT which shows what is expected after the execution of the pattern (Fig. 4). This template is created on the basis of generated fault model FDT and is traversed separately via the march test algorithm that is used in the test pattern.

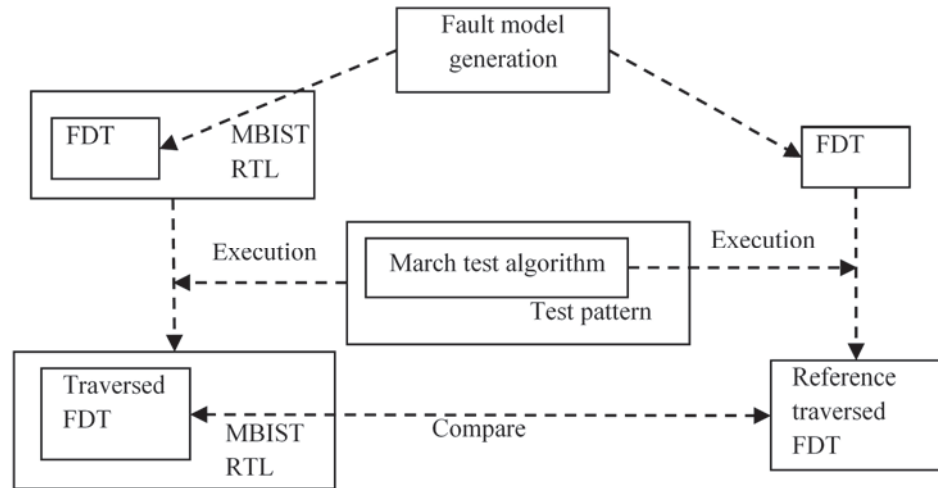


Fig. 4. Verification of test patterns

4. Verification of chain analysis for test and diagnosis flow. Since the memory test and diagnosis is time-sensitive, parallel testing of multiple memory instances is crucial. BIST instructions for multiple memory instances that need to be executed simultaneously are usually combined in groups during the test pattern creation.

Generally, the test and diagnosis flow implementation in test automation tools consists of four phases (test, detection, classification and localization) [8] described below via test pattern templates. Templates are used to generate a pattern instance for the corresponding phase. Each phase requires specific analysis of the MBIST output chains.

Test. Pattern template:

1. SELECT_MEMORY_GROUP
2. LOAD_TEST_ALGORITHM
3. RUN_BIST
4. READ_FAILED_MEMORY_INFO

Description: This pattern loads the test algorithm into the BIST, while instructing to run it on the specified memory groups. Information on failed memories is obtained from BIST, which can help to narrow the set of memories for further diagnostics, by excluding them from memory groups for the next test patterns.

Verification of the chain analysis: Verification of the reported information on failed memories is based on the conformity with memories used for fault injection in the fault injection file.

Detection. Pattern template:

1. SELECT_MEMORY_GROUP
2. LOAD_TEST_ALGORITHM

3. SET_SONE I
4. RUN_BIST
5. READ_DIAGNOSTIC_INFORMATION

Description: This pattern also loads the test algorithm into the BIST while specifying the value of stop on N-th error register. This will command the BIST to stop the test algorithm execution after the N-th error has been encountered (totally N read operation of march test algorithm have returned the value that was not expected). Diagnostic information on the last failed memory cell and applied test operation is obtained from BIST as a binary chain with the last instruction of the test pattern, and further evaluated by software tools for convenient representation. The general information provided is:

1. Memory failed word address.
2. Memory failed bit.
3. March test failed operation.

Verification of the chain analysis: The verification of the reported diagnosis information is based on the conformity with banks, addresses and bits used for fault injection in the fault injection file.

Classification. Description: The fault classification step uses the test pattern template which was the described point **a**, while applying fault classification march test algorithms specifically designed for this diagnosis phase, **n** number of pattern executions need to be made while modifying value **I** to make sure that **n** read operations have been applied on the faulty cell, where **n** is the number of read operations present in test algorithm [8]. The test syndrome is generated as a result, which is **n**-bit signature, where the order of bits corresponds to the sequence of the read operations in the test algorithm. The faults are classified based on the obtained signature.

Verification of the chain analysis: The verification of this phase is done by checking the conformity of the classified fault type with FP used in the fault injection file.

Localization.

The test pattern template for this phase is as follows:

1. SELECT_MEMORY_GROUP
2. APPLY_ADAPTIVE_TEST_ALGORITHM
3. READ_DIAGNOSTIC_INFORMATION

Description: This pattern is generally used with coupling faults for locating the aggressor cell. An adaptive march-like algorithm is applied [8] to the neighborhood of a memory victim cell (Fig. 2), usually determined after execution of pattern **b**. The idea of the algorithm is:

1. Set the potential aggressor cell values opposite to the fault activation initial value of aggressor for the coupling fault.

2. Apply the sequence of the fault activating operations to the potential aggressor or victim cell depending on the type of the coupling fault.
3. Read the value of the victim cell.
4. If the fault is not triggered, repeat steps 1-3 for the next potential aggressor.
5. The algorithm stops when the faulty value is finally observed on the victim cell.

Verification of the chain analysis: The verification is based on the conformity with banks, addresses and bits of aggressor cells used in fault injection files.

5. Experimental results. Diagnosis flow implementation along with the implementation of fault model generation flow were verified with VLP1(26N), VLP2(26N), VLP3(22N), March FFDD (42N) algorithms [5]. The MBIST flow was simulated separately for each fault and faults were detected. Using the fault classification step of diagnosis flow FinFET-specific faults were successfully determined and classified.

An example of FinFET-specific <R0R0R0R0R0/1/1> fault traversed by March FFDD algorithm is provided in Fig. 5.

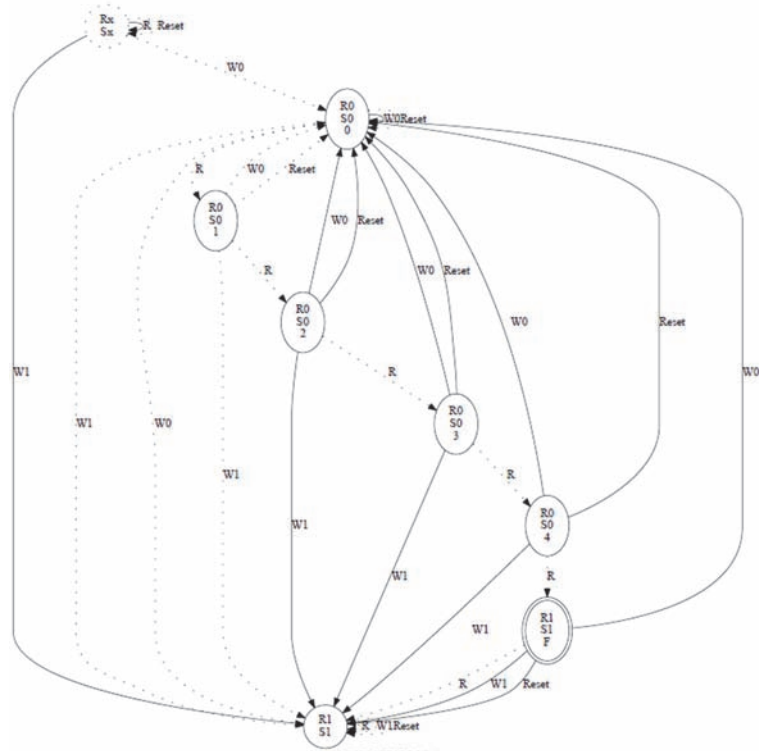


Fig. 5. <R0R0R0R0R0/1/1> fault traversed by March FFDD

6. Use of the approach for the predicted faults. As it was mentioned above, a multidimensional prediction mechanism for memory fault classification introduced in [12] allows to predict new types of faults in memory. The suggested verification approach can avail of the mechanism if several additional changes will be made in the fault model generation and injection part to reflect the knowledge reflected in the prediction mechanism.

Conclusion. A built verification environment for test and diagnosis flow implementation within software post-silicon analysis automation tools is described in this paper. The test results on the fault DFA model behavior on recently considered fault types, using the fault classification flow are provided.

The verification environment is implemented in DesignWare STAR Memory System Yield Accelerator [2] tool that is currently used both in the development of MBIST and during the test and diagnosis of SoCs with an embedded MBIST engine. Some further work connected with the extension of the approach for the predicted new types of faults is outlined too.

REFERENCES

1. **Zorian Y., Shoukourian S.** Embedded memory test and repair: infrastructure IP for SOC yield // IEEE Design and Test of Computers.- 2003.- Issue 6.- P. 58-66.
2. **Zorian Y., Shoukourian S.** Test Solutions for Nanoscale Systems-on-Chip: Algorithms, Methods and Test Infrastructure // Selected papers of Ninth International Conference on Computer Science and Information Technologies.- IEEE.- 2013.- P. 1-3.
3. **Van de Goor A.J.** Testing Semiconductor Memories: Theory and Practice.- Wiley & Sons Inc, 1998.- 512 p.
4. Quality assurance in memory built-in self-test tools / **A. Au, A. Pogiel, J. Rajski, et al** // 17th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems.- 2014.- P. 39-44.
5. 1149.1-2013 - IEEE Standard for Test Access Port and Boundary-Scan Architecture - IEEE Standard.
6. 1500-2005 - IEEE Standard Testability Method for Embedded Core-based Integrated Circuits - IEEE Standard.
7. 1687-2014 - IEEE Standard for Access and Control of Instrumentation Embedded within a Semiconductor Device - IEEE Standard.
8. **Harutyunyan G., Martirosyan S., Shoukourian S., Zorian Y.** Memory Physical Aware Multi-Level Fault Diagnosis Flow // IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing.- 2018.- P. 1-12.
9. **Liu Y., Xu Q.** On Modeling Faults in FinFET Logic Circuits // IEEE International Test Conference.- 2012.- P. 1-9.

10. **Lin C.-W., Chao M. C.-T., Hsu C.-C.** Investigation of Gate Oxide Short in FinFETs and The Test Methods for FinFET SRAMs // VLSI Test Symposium.- 2013.- P. 1-6.
11. **Chi M.-H.** Challenges in Manufacturing FinFET at 20nm Node and Beyond // Globalfoundries.- 2012.-P. 1-2.
12. **Harutyunyan G., Shoukourian S., Zorian Y.** Fault Awareness for Memory BIST Architecture Shaped by Multidimensional Prediction Mechanism // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems.- 2019.- Vol. 38, No. 3.- P. 562-575.
13. Synopsys Inc. // <https://www.synopsys.com/verification/simulation/vcs.html>, VCS Functional Verification Solution.
14. **Hayrapetyan D., Manukyan A., Tshagharayn G.** Implementation of memory static, coupling and dynamic fault models at the register transfer level // IEEE East-West Design & Test Symposium.- 2018.- P. 744-748.
15. **Harutyunyan G., Tshagharayn G., Vardanyan V., Zorian Y.** Fault Modeling and Test Algorithm Creation Strategy for FinFET-Based Memories // IEEE 32nd VLSI Test Symposium.- 2014.- P. 1-6.
16. **Hayrapetyan D., Manukyan A.** Modeling dynamic single-cell and coupling faults via automata models // Computer Science and Information Technologies (CSIT).- 2017.- P. 65-68.
17. **Hamdioui S., Al-Ars Z., Van de Goor A.J., Rodgers M.** Linked Faults in Random Access Memories: Concept, Fault Models, Test Algorithms, and Industrial Results // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems.- 2004.- Vol. 23, No. 5.- P. 737 – 757.
18. **Hayrapetyan D.** Modeling linked faults via automata models // IEEE East-West Design & Test Symposium.- 2017.- P. 237-241.
19. US 7,768,840 B1. Memory modeling using an intermediate level structural description / **K. Aleksanyan, K. Amirkhanyan, S. Shoukourian, et al.- 2010.**

Yerevan State University. The material is received on 01.04.2019.

Դ.Լ. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ

ՀԵՏՄԻԼԻԿՈՆԱՅԻՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ԳՈՐԾԻՔՆԵՐՈՒՄ ՀԻՇՈՂՈՒԹՅԱՆ ԹԵՍՏԱՎՈՐՄԱՆ ԵՎ ԱՐԱՏՈՐՈՇՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՆԵՐԻ ԻՐԱԿԱՆԱՑՄԱՆ ՍՏՈՒԳՈՒՄԸ

Արդի բյուրեղի վրա համակարգերում (SoC) ներկառուցված նանոչափական հիշող սարքերի արագորեն աճող խտությամբ և հզորությամբ պայմանավորված՝ ի հայտ են գալիս նախագծման նոր խնդիրներ, ինչպես նաև, բարձր որակը և արտադրողականությունը ապահովվելու նպատակով, խստացվում են պահանջները թեստավորման և արատորոշման նկատմամբ: Սա հանգեցնում է հետսիլիկոնային վերլուծության ավտոմատացման ծրագրային տարբեր գործիքներում իրականացված հիշողության թեստավորման, սխալների հայտնաբերման, տեղայնացման և դասակարգման առկա գործընթացների փոփոխման և/կամ նորերի ստեղծման անհրաժեշտությանը: Այս հոդվածում առաջարկվում է այդ գործիքների ստուգման մոտեցում:

Առանցքային բառեր. ստուգում, հիշողության թեստավորում, հիշողության արատորոշում, հիշողության սխալներ, թեստավորման կադապար:

Д.Л. АЙРАПЕТЯН

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕСТИРОВАНИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПАМЯТИ В ПРОГРАММНЫХ ИНСТРУМЕНТАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОСТСИЛИКОНОВОГО АНАЛИЗА

Резкое увеличение плотности и мощности нанометровых устройств памяти, встроенных в системы на кристалле (СнК), приводит к новым проблемам проектирования, а также ужесточению требований к тестированию и диагностированию. Это вызывает необходимость модификации имеющихся или реализации новых процессов тестирования; нахождения, локализации и классификации ошибок в программных инструментах автоматического постсиликонового анализа. В статье предлагается подход к верификации этих инструментов.

Ключевые слова: верификация, тестирование памяти, диагностирование памяти, ошибки памяти, тестовый шаблон.

D.G. SARGSYAN

**FUNCTIONAL TESTING SCENARIOS FOR EMBEDDED MEMORIES IN
AUTOMOTIVE SOC**

Periodic testing of embedded memory devices in modern system-on-chips (SoC) is becoming an increasingly common requirement. Automotive is one of the largest semiconductor markets with the requirement of in-field testing of embedded memories. Hardware implementation of test algorithms in memory built-in self-test (BIST) scheme allows in-field testing only with predefined instructions which restricts flexibility of system test in mission mode. In this paper, different scenarios for memory testing in mission mode is proposed, which are controlled and configured by microcontrollers Safety Manager.

Keywords: built-in self-test, in-field test, memory test, automotive.

Introduction. At the moment, the automotive industry is one of the fastest growing sectors in semiconductors industry. The reason for such growth is the rapid technological progress and the increasing need of more power systems in automobiles. The tendency for greater safety and better driving experience is forcing automakers to continually integrate more and more Electronic Control Units (ECU) like Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) and In-Vehicle Infotainment (IVI) into their vehicles. Some of the examples of such systems are adaptive cruise control, parking assistance, automotive emergency braking, lane change assistance, and so forth. The failure in those systems could damage the health of people, thus they have very high safety and reliability requirements.

These high demands in the automotive motivated the emergence of the ISO 26262 standard [1]. This standard defines the requirements for achieving an acceptable level of risk for electrical and/or electronic systems intended to be used in the automotive. The final product can be qualified with one of the automotive safety integrity levels (ASIL) A-D. In ISO 26262 ASIL classifications are used to express the level of risk reduction to prevent hazards. ASIL D is the highest level and ASIL A is the lowest. The ASIL level calculated for the given hazard is then assigned to the safety goal. ASIL is determined based on a combination of the probability of exposure, the possible controllability by a driver, and the possible outcome severity if a critical event occurs.

The automotive industry has a strong need for flexible and reusable test architectures, which will ensure effective and low-cost solutions for mission mode fault detection abilities in SoCs. These requirements and the need of extensive

verification due to safety-critical environments requires firmware development to happen concurrent with hardware development.

In the next section of this paper testing modes for the automotive are presented. Section 3 describes a testing strategy for automotive memories in the field. Finally, section 4 concludes the paper.

1. Testing modes for automotive. In order to have a high level of safety and reliability of automotive memories, there is a need to have robust test and repair solutions not only at the production mode but also in the field. Traditional manufacturing tests are not applicable for the field testing, so there are several solutions proposed in this regard [2,3]:

- Power-on Self-test (POST);
- Periodic testing for permanent fault detection;
- Error Correcting Codes (ECC) for transient fault detection.

1.1. Production Mode Testing. One of the conceptual requirements for an automotive is the supreme product quality, which can be assured with high yield and low DPPM criteria for the produced chips. During the manufacturing process, it is achieved with the help of efficient test and repair algorithms. There are already efficient test algorithms developed which provide full coverage for each class of faults, but they have different complexities and therefore different runtime requirements.

1.2. Power-on mode testing. Enabling the test also in the field is a specific requirement for functional safety-oriented applications. In contrast to manufacturing, in the field, the requirements to the test are more stringent due to number of area, power and time-related constraints. Therefore, several alternative solutions are proposed aimed at meeting them. One such type of an in-field test is POST. The main goal of POST is to quickly test whether all devices are properly connected and accurately function before the car is turned on and report if any problem is found. The other functionality of POST is related to the memory repair. During the manufacturing, the repair signature is stored in the eFuse array, and that information must be sent to memory at power-on. Since the POST time is short, there is a strong requirement to transfer that information faster.

1.3. Mission mode testing. Another type of the in-field test which is used in the mission mode is Periodic test. Periodic test ensures that the device has not become unsafe since the POST was performed. The Periodic self-test starts at least once per safety interval, which is defined by safety-critical devices as a period of time during which failure can occur. The first difference of POST and Periodic test is that during the Periodic test, there is no need to have a repair option. The main goal of Periodic test is to check if there is an issue in a device, and inform driver about it. The second difference is that they have different test flows.

The other type of testing used in the mission mode is the error correction code (ECC) [4,5]. The techniques discussed above targeted the testing of hard faults, nevertheless, in order to adhere safety and reliability requirements there is a need to address also the soft errors occurring in the mission mode.

2. Memory testing strategy in the mission mode. Automotive industry has a strong need for flexible and reusable test architectures, which will ensure efficient and low-cost solutions ensuring advanced fault detection capabilities for SoCs in the mission mode. The generated Firmware allows to have programmable test solutions, which should be controlled by the Safety Manager of the corresponding MCU [6]. The case study in this section demonstrates the proposed strategy of testing embedded memories in automotive SoCs during Power-on Self-test mode and Mission mode. The strategy is based on the following instructions:

1. Grouping the memories of the same cluster (e.g., memories for Audio Player, memories for Engine Control, memories for Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), etc);
2. Selection of the test algorithm for the corresponding memory group.

Fig. 1 demonstrates the scenario of testing the embedded memories during Power-on self-test mode. It consists of the following steps:

1. Checking the safety mechanism:
 - Before starting to test the embedded memories, at first, there is a need to make sure that BIST system is functioning correctly.
 - For this purpose, faults are injected into the system and status bits are verified.
2. Running Logic BIST to check the circuit logic including MBIST and ECC logic:
 - This is the logical continuation of the first step, where the Logic BIST has invoked to check whether the logical components of the system are functioning correctly.
3. Repairing the memories by loading repair information from NVM:
 - After the manufacturing test, those memories which had problems are repaired, and defective rows and columns are replaced with the reserved ones. This information is kept in non-volatile memory (NVM) (e.g., electrical Fuse) and should be loaded by Safety Manager whenever the car is turned on.
4. Selecting the set of test algorithms:
 - Selecting the test algorithms means to detect the aging faults which happen after manufacturing.
 - The selection of the group of algorithms may also depend on the time that passed after turning off the car last time.

5. Runing memory BIST for the selected group of memories with the chosen set of algorithms:
 - After all these steps, the embedded memories should be tested before switching to the mission mode.
6. Initializing the selected memories with predefined data:
 - In this step memories are initialized with some predefined data before entering the mission mode.

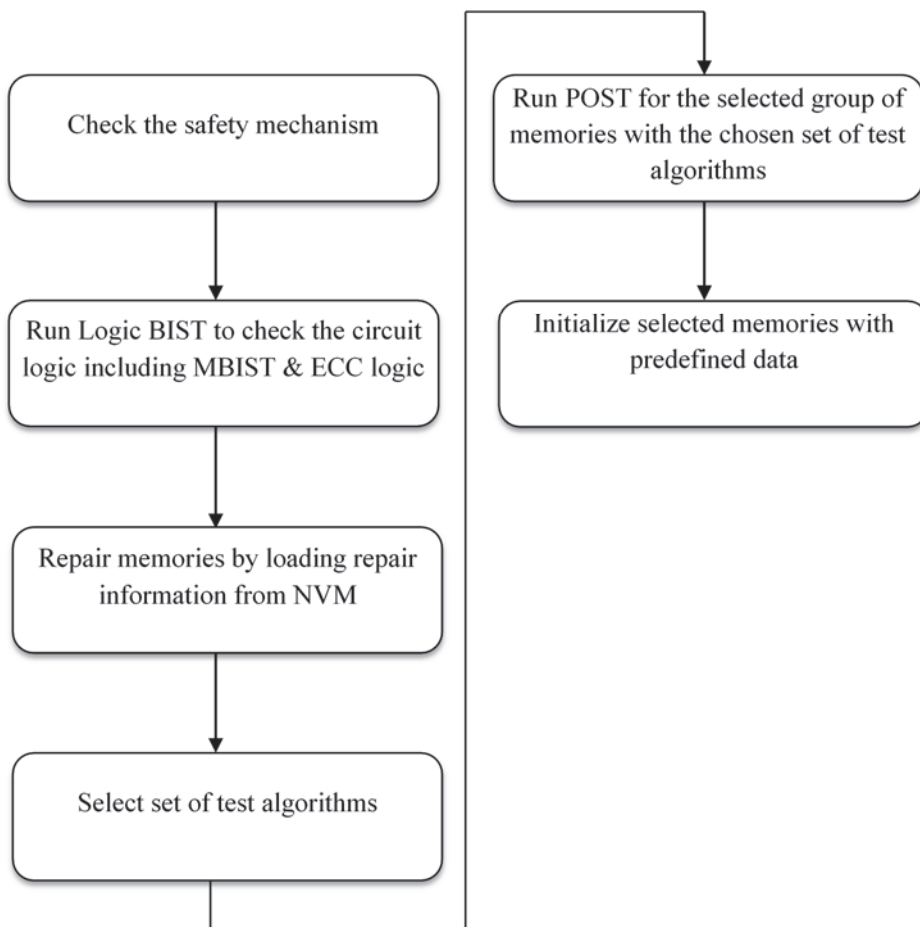


Fig. 1. A Memory testing scenario for the Power-on Self-test

Fig. 2 demonstrates the scenario of testing the embedded memories during the Mission mode. It consists of the following steps:

1. ECC for transient faults:
 - Faults are classified as permanent when a device has a failure in multiple intervals. In contrast, transient faults are generating errors only in a single scrub

interval. Experiments indicate that the majority of the observed SRAM faults in the field are transient faults and they are due to single-bit faults. The transient errors and subset of permanent faults can be detected and possibly corrected by Error correcting codes (ECC).

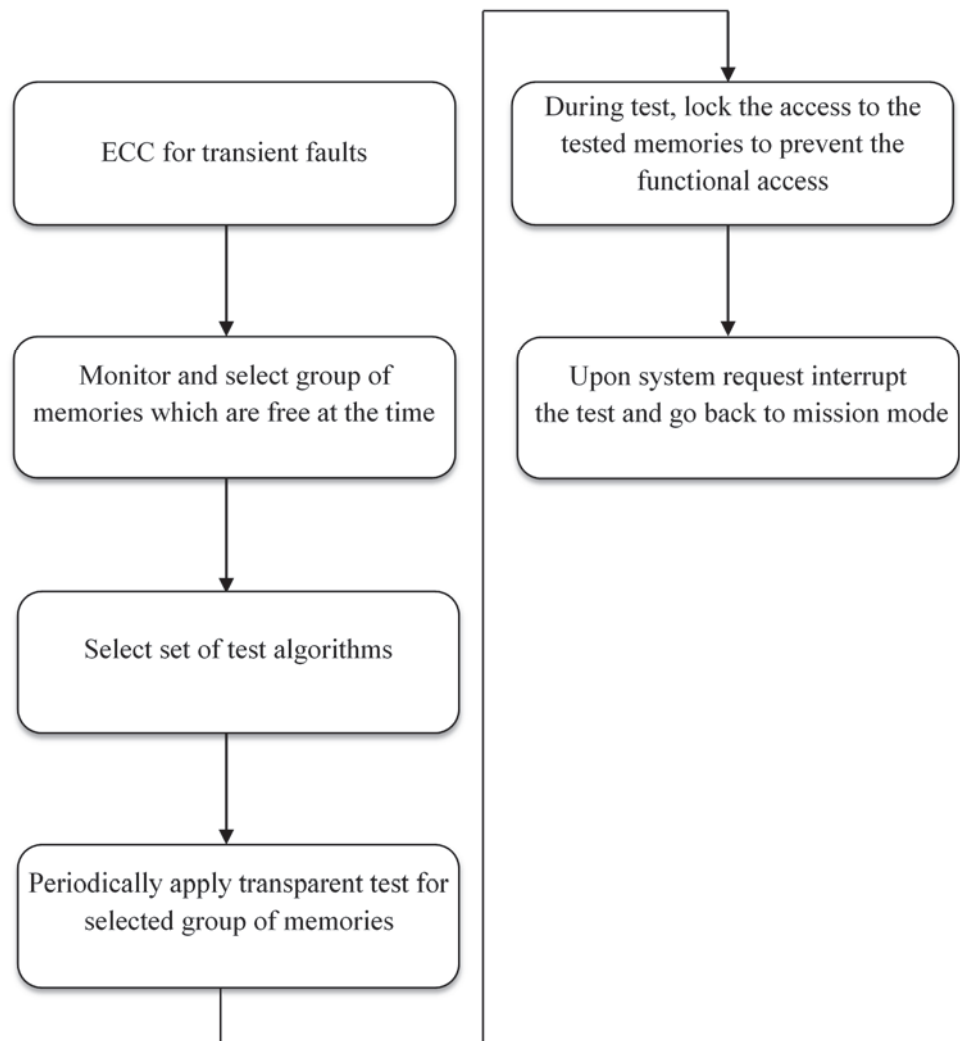


Fig. 2. A memory testing scenario for the Mission mode

2. Monitoring and selecting group of memories which are free at the time:

- During the mission mode, some groups of memories are functioning and some of them are free. Before the test starts, the group of free memories should be found.

3. Selecting the set of test algorithms:

- In this mode also, the selection of appropriate set of test algorithms may depend on different factors.

4. Periodically applying a transparent test for the selected group of memories [7,8]:

- Since memories are in the mission mode, the content should be maintained, therefore, here, a transparent test must be applied. The test is invoked periodically (e.g., 100 ms) with a series of short sequence of transactions or bursts.

5. During the test, lock the access to the tested memories to prevent the functional access:

- When memories are in the testing mode the access to them should be prevented in order to keep the memory content safe and have correct the test results.

6. Upon the system request, interrupt the test and go back to the mission mode:

- There may be special cases when access to the memory under the test comes by the system request. Here the test must be immediately stopped, the memory must be reverted, and access must be given to the system.

Conclusion. Meeting the requirements of the ISO 26262 standard becomes more difficult as the device complexities continue to grow. In this paper, at first, the introduction to the automotive industry with the overview of its various aspects, including safety, reliability and testability is introduced. Afterwards, the built-in test solution demands, and concepts are explained for various operating modes of vehicles including production, power-on and mission. Finally, memory testing scenarios are presented for both the Power-on Self-test mode and the Mission mode controlled by the microcontroller Safety Manager.

REFERENCES

1. ISO 26262, <https://www.iso.org/standard/43464.html>.
2. **Sargsyan D.** ISO 26262 Compliant Memory BIST Architecture // International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT).- 2017. – P. 164-167.
3. **Pateras S.** Memory BIST for automotive designs // Tech Design Forum.- December 29, 2015.
4. Tezzaron Semiconductor, “Soft Errors in Electronic Memory. – A White Paper”, Jan. 2004.
5. **Baumann R.C.** Radiation-induced soft errors in advanced semiconductor technologies // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability.- Sep. 2005.- Vol. 5, No. 3.- P. 305-316.
6. **Sargsyan D.** Firmware Generation Architecture for Memory BIST // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS).- 2018.
7. **Nicolaidis M.** Theory of Transparent BIST for RAMs // IEEE Transactions On Computers.- 1996.- Vol. 45, no. 10.- P. 1141-1156.

8. **Dutta A., Alampally S., Kumar A., Parekhji R.A.** A BIST Implementation Framework for Supporting Field Testability and Configurability in an Automotive SOC // Workshop on Dependable and Secure Nanocomputing.- 2007.

Yerevan State University. The material is received 05.23.2019.

Դ.Գ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ՆԵՐՂՐՎԱԾ ՀԻՇՈՂ ՍԱՐՔԵՐԻ ՖՈՒՆԿՑԻՈՆԱԼ ԹԵՍՏԱՎՈՐՄԱՆ ՍՑԵՆԱՐԵՆ ԱՎՏՈՄՈԲԻԼԱՅԻՆ ԲՅՈՒՆԵՂՈՒՄ

Արդի բյուրեղի վրա համակարգերում ներկառուցված հիշող սարքերի պարբերական թեստավորումը դառնում է հիմնական անհրաժեշտություններից մեկը: Ավտոմոբիլային համակարգերը դարձել են կիսահաղորդիչներ օգտագործող ամենամեծ շուկաներից մեկը, որոնք պահանջում են ներդրված հիշող սարքերի թեստավորում ֆունկցիոնալ աշխատանքի ժամանակ: Ներդրված թեստավորման համակարգերում թեստային ալգորիթմների ապարատային իրականացումը թույլատրում է թեստավորում ֆունկցիոնալ աշխատանքի պահին՝ միայն նախապես ծրագրավորված հրամաններով, որը սահմանափակում է թեստավորման ճկունությունը: Հոդվածում ներկայացված են ներդրված հիշող սարքերի թեստավորման տարբեր սցենարներ ֆունկցիոնալ աշխատանքի ընթացքում, որոնք ղեկավարելու է միկրոպրոցեսորը:

Առանցքային բառեր. ներկառուցված թեստավորման համակարգ, թեստավորում ֆունկցիոնալ աշխատանքի պահին, հիշողության թեստավորում, ավտոմոբիլային համակարգեր:

Д.Г. САРКИСЯН

СЦЕНАРИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ ПАМЯТИ, ВСТРОЕННЫХ В СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ СИСТЕМ

Периодическое тестирование устройств памяти, встроенных в современные системы на кристалле (СнК), становится все более необходимым требованием. Автомобильные системы являются одним из крупнейших рынков полупроводников с требованием тестирования встроенной памяти в реальном времени. Аппаратная реализация тестовых алгоритмов во встроенных системах самотестирования обеспечивает тестирование только с predetermined инструкциями в функциональном режиме, что ограничивает гибкость тестирования. В статье предлагаются различные сценарии тестирования памяти в функциональном режиме, которые управляются и настраиваются микропроцессором.

Ключевые слова: встроенная система самотестирования, тестирование памяти, тестирование памяти в функциональном режиме, автомобильные системы.

A.A. PETROSYAN, G.A. PETROSYAN

**A MODEL FOR CALCULATING THE PROPAGATION DELAY OF
DIGITAL ELEMENTS CONSIDERING THE RADIATION IMPACT**

This paper proposes a model for calculating the propagation delay of digital elements taking into account radiation-induced single event transients (SET). The main idea of this work is to determine the propagation delay of digital elements in integrated circuits (IC) without running the circuit level simulation. Analytical equations are derived to calculate the propagation delay of logic gates. The propagation delay of NAND gates chain is evaluated with proposed analytical formulas and with HSPICE simulation. The comparison of the evaluation results between HSPICE simulation and the model shows that the created analytical model forecasts the propagation delay of digital elements with a 90.3% of accuracy. This model can be integrated into the design process of radiation hardened ICs.

Keywords: single event transients (SET), Technology Computer-Aided Design (TCAD), complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS), propagation delay, analytical model, single event upsets (SEU), soft errors, linear energy transfer (LET), radiation effect.

Introduction. Digital integrated circuits (IC) are widely used in electronic systems which operate in different environments such as aerospace and nuclear reactors. In such environments, ICs are under the influence of high radiation. Energetic particles formed in the radiation zone hit the sensitive region of ICs and form new electron-hole pairs. The generated electron-hole pairs may lead to a transient pulse which can alter several parameters of CMOS digital elements. The propagation delay is one of the parameters which could be altered by radiation. The generated transient pulse is known as a single event transient (SET). The SET formation and propagation through the entire logic may change the states of latches or other memory elements [1]. This kind of degradation can be masked by several factors which can eliminate the SET's propagation. It is known that there are temporal, logical and electrical masking factors [2]. Although those masking factors cancel the SET error, the correct behavior of ICs is not guaranteed in all circumstances.

The consideration of the SETs becomes more important with the process and technology scaling. Several researches show that with the scaling of the technology, electronic devices will be increasingly susceptible to SETs [2]. Such vulnerability can cause degradation of parameters of digital elements which may lead to serious issues. Therefore, the development of new and reliable SET

sensitivity analysis methods, which will be used in the design process of IC is crucial. Several SET analysis and methods require circuit level simulation. However, circuit level simulation and circuit analysis, considering SETs depending on the amount of the transistors in the design can be time consuming. The number of transistors in ICs is growing, which manifests the need for development of new methods in other abstraction levels of the design flow [1]. The main goal of this study is to provide an analytical model, which will determine digital IC's propagation delay dependency on the SET effect without using the circuit-level simulation.

The SET impact on 2-input NAND gate propagation delay. High energy particles in radiation environment such as neutrons, heavy ions, protons or alpha particles strike the surface of the CMOS circuits forming SET effect. Generally, the SETs occur on the OFF-state transistors as the generated electron-hole pairs collected by the drain [2].

In HSPICE, the SET can be represented as a current spike which is modelled, by using a double exponential current source [3]. The equation (1) illustrates the current pulse function [4]:

$$I_{SET} = I_{peak} * \frac{\left(e^{-\frac{t-t_{SET_end}}{\tau_2}} - e^{-\frac{t-t_{SET_start}}{\tau_1}} \right)}{\cos(\theta)}, \quad (1)$$

where I_{peak} - is the maximum amplitude of the current, τ_1 - the collection time constant of the junction, and τ_2 - the time constant of the initial establishment of the ion track, t_{SET_start} - is the SET strike moment, t_{SET_end} - the end of SET, θ - the impact angle of a high energy particle to the surface of the circuit in radians. The total current goes up as the angle of the incident particle rises. The approximate maximum current is linearly proportional to the energy of the particle (2):

$$I_{peak} = \frac{Q}{(\tau_1 - \tau_2)}, \quad (2)$$

where Q is the amount of the collected charge.

The equations show that the amplitude of the current pulse I_{SET} and the duration of the current pulse T_{SET} are the major influencing parameters to be considered in calculation of the propagation delay. The duration of the SET is calculated by equation (3):

$$T_{SET} = t_{SET_end} - t_{SET_start}. \quad (3)$$

As an example of impact of a high-energy particle strike, a 2-input NAND gate is modelled with the above explained double exponential current pulse function. Fig.1 presents the mechanism of injection of the double exponential current source on the sensitive transistors of the NAND gate.

Assume that input A of the NAND gate is set to logic "1" and input B changes over time. The moment that the input B switches from logic "1" to logic "0" transistors M2 and M4 are at the OFF state which means they are vulnerable to the SETs. In Fig 1a. the SET strike at the sensitive M2 transistor is shown. The current pulse generation at the moment of switching from "1" to "0" leads to rising of low to high propagation delay Fig 1b.

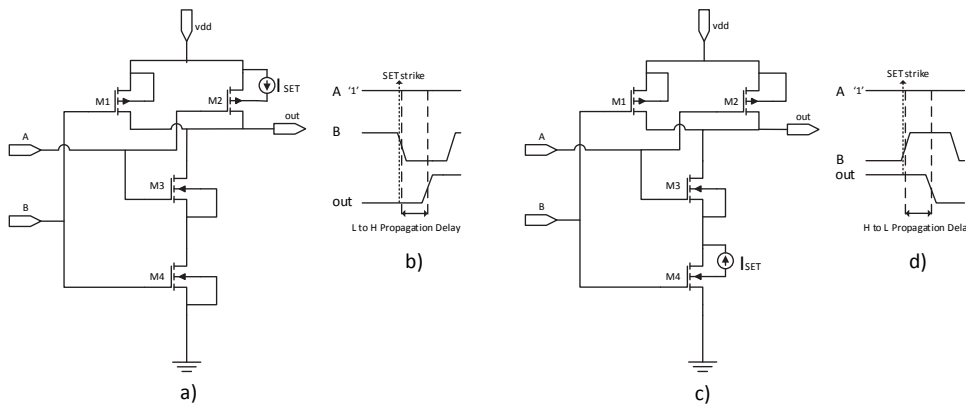


Fig.1. Injection of double exponential current source on a) sensitive M2 transistor b) low to high propagation delay formation after the SET strike c) the SET impact at the sensitive transistor M4 d) high to low propagation delay formation after the SET strike

On the other hand, when input B changes from logic "0" to logic "1" transistors M3 and M4 are defenseless against the SETs. In Fig 1c SET impact at the sensitive transistor M4 is presented. In this case high to low propagation delay rises when input B changes from logic "0" to "1" Fig. 1d. a SET strike on a NMOS transistor is simulated with a current injected between the drain of the transistor and out the body of the transistor. The SET impact on a PMOS transistor is simulated with a current flowing through the body to the drain of the device.

Such behavior of logic gates after they are exposed to SET radiation effect leads to the increase of propagation delay. If the event occurs in the critical parts of IC, single event upsets (SEU) or soft errors [2] can be formed.

HSPICE transient analysis for different radiation levels is performed to calculate high to low and low to high propagation delays of a 2-input NAND gate by injecting a double exponential pulse given by (1) at SET sensitive transistors M2 and M4. The linear energy transfer (LET) of the energetic particle and current

pulse parameters are given in Table 1 which are gathered from TCAD simulations [4] and other realistic statistical data [5].

Table 1

Current pulse parameters

$Q[fc]$	$\tau_1[ps]$	$\tau_2[ps]$	$T_{SET}[ps]$	$\theta [rad]$	LET [$MEV cm^2 mg^{-1}$]
8	10	20	12	30	0.25
10	10	20	23	30	1
100	10	20	50	30	10
300	10	20	80	30	14.47
525	10	20	110	30	25.31
801	10	20	140	30	38.62
990	10	20	250	30	47.74
1200	10	20	270	30	57.86

HSPICE simulation results of 2-input NAND gate for low to high propagation delay ($T_{L \rightarrow H}$) are presented in Table 2 [6]. $T_{L \rightarrow H}$ rises with the increase of the amplitude (I_{SET}) and the duration (T_{SET}) of the current pulse. An example of such simulation is presented in Fig. 2, when $T_{SET} = 80 ps$ and $I_{SET} = 800 \mu A$. The results show that the $T_{L \rightarrow H} = 99.814 ps$.

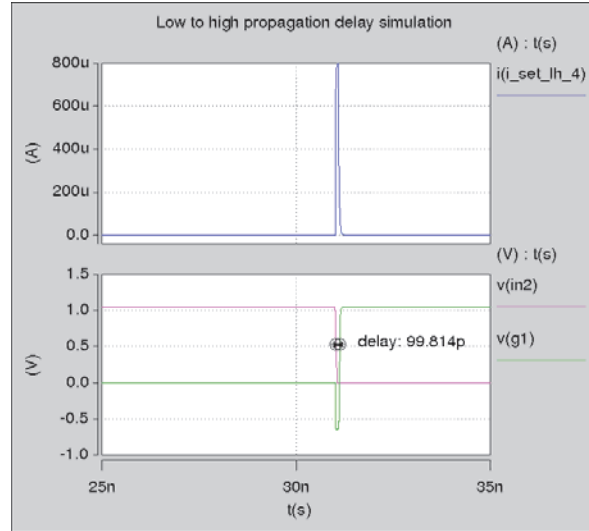


Fig.2. HSPICE simulation results for 2-input NAND gate low to high propagation delay when $T_{SET} = 80 ps$ and $I_{SET} = 800 \mu A$

Table 2

HSPICE Simulation results for 2-input NAND gate low to high propagation delay

T_{SET} [ps]	I_{SET} [μA]	$T_{L \rightarrow H}$ [ps]
12	140	16.90
23	677	39.57
50	740	68.27
80	800	99.81
110	1650	143.32
140	1900	177.12
250	1600	283.67
270	1700	304.91

Similarly, 2-input NAND gate's HSPICE simulation results for high to low propagation delay $T_{H \rightarrow L}$ are presented in Table 3. High to low propagation delay also gets bigger when the amplitude (I_{SET}) and the duration (T_{SET}) of the current pulse values rise.

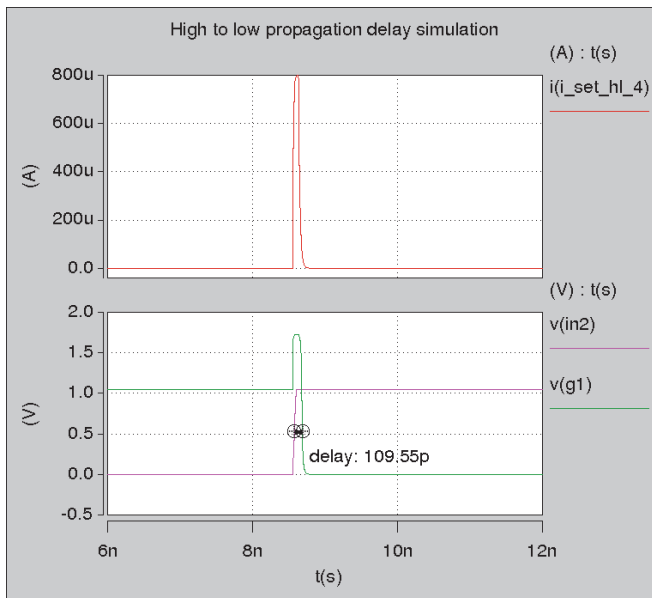


Fig.3. HSPICE simulation results for 2-input NAND gate high to low propagation delay when $T_{SET} = 80$ ps and $I_{SET} = 800 \mu A$

Table 3

HSPICE Simulation results for 2-input NAND gate high to low propagation delay

$T_{SET}[ps]$	$I_{SET}[\mu A]$	$T_{H \rightarrow L}[ps]$
12	140	18.56
23	677	48.99
50	740	77.99
80	800	109.55
110	1650	154.04
140	1900	186.67
250	1600	293.44
270	1700	314.67

An HSPICE simulation example of high to low propagation delay is presented in Fig. 3, where the delay is equal to 109.55 ps.

The proposed technique to calculate propagation delay of digital elements considering the radiation exposure. Based on HSPICE simulation results presented in Tables 2 and 3, analytical equations for low to high (4) and high to low (5) propagation delay calculation of 2-input NAND gate are proposed. The equations are created using Wolfram Mathematica tool's [7] "fit data" algorithms.

$$T_{PD_{L \rightarrow H}} = 30.9632 + 0.102407 * T_{SET} + 0.00233277 * T_{SET}^2 - 4.77198e^{-6} * T_{SET}^3 - 0.0784258 * I_{SET} + 0.00128404 * T_{SET} * I_{SET} - 7.62958e^{-7} * T_{SET}^2 * I_{SET} + 1.16931e^{-5} * I_{SET}^2 - 5.184347e^{-7} * T_{SET} * I_{SET}^2 - 2.763716e^{-8} * I_{SET}^3, \quad (4)$$

$$T_{PD_{H \rightarrow L}} = -16.5627 + 0.938275 * T_{SET} - 0.0045319 * T_{SET}^2 + 0.0000113 * T_{SET}^3 + 0.205052 * I_{SET} + 0.000658129 * T_{SET} * I_{SET} - 2.26109e^{-6} * T_{SET}^2 * I_{SET} - 0.0002773 * I_{SET}^2 - 6.81333e^{-8} * T_{SET} * I_{SET}^2 + 1.15608e^{-7} * I_{SET}^3. \quad (5)$$

The Fig. 4 3D plot compares the HSPICE simulation (dotted plot) and the analytical calculation (4) results (solid plot) of low to high propagation delay. The results are approximately equal. Which confirms the effectiveness of equation (4).

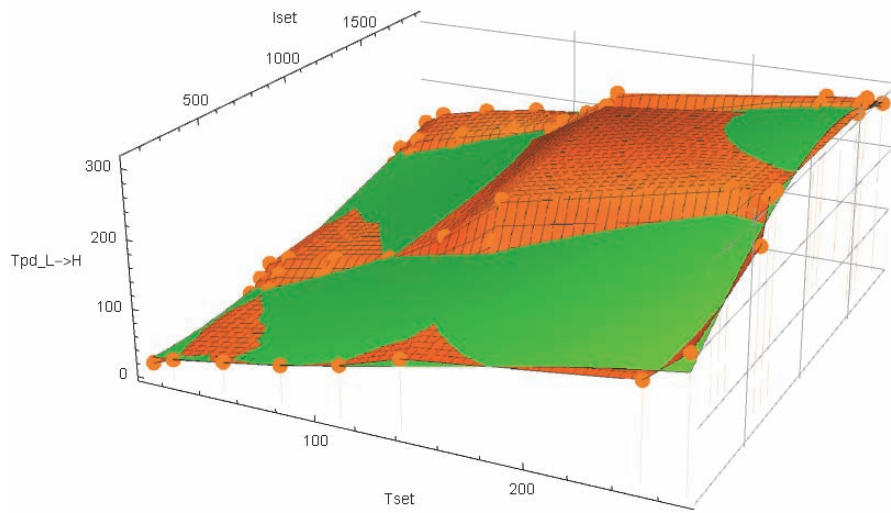


Fig.4. The 3D plot comparison of 2-input NAND gate's low to high propagation delays measured with HSPICE simulation "dotted plot" and with analytical equation "solid plot"

Moreover, table 4 shows the propagation delay results with the SET duration of $T_{SET} = 80 \text{ ps}$ and the current pulse level with $I_{SET} = 800 \text{ } [\mu\text{A}]$. The absolute percentage error between the results of HSPICE simulation and equation (4) is 1.3 %.

Table 4

The comparison of 2-input NAND gate low to high propagation delay evaluation using HSPICE simulation and the analytical equation.

$T_{SET} [\text{ps}]$	$I_{SET} [\mu\text{A}]$	$T_{L \rightarrow H} [\text{ps}]$ (Analytical Equation)	$T_{L \rightarrow H} [\text{ps}]$ (HSPICE)	Absolute percentage error %
80	800	101.2	99.81	1.3

Fig. 5 represents the 3D plot comparison of HSPICE simulation (dotted plot) and the results of high to low propagation delay obtained using equation (5) (solid plot). The results are almost the same which means that equation (5) is effective to be used in high to low propagation delay calculation as well.

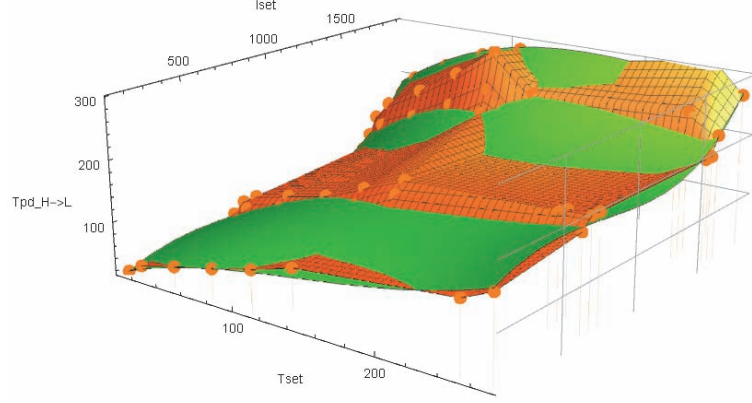


Fig.5. The 3D plot comparison of 2-input NAND gate's high to low propagation delays dependency on T_{SET} and I_{SET} measured with HSPICE simulation "dotted plot" and with analytical equation "solid plot"

Table 5 shows the high to low propagation delay results with the SET duration $T_{SET} = 80$ ps and the current pulse level with $I_{SET} = 800$ [μA] resulting after the SET the influence. The absolute percentage error is 1.3%.

Table 5

The comparison of high to low propagation delay evaluation using HSPICE simulation and the analytical equation

T_{SET} [ps]	I_{SET} [μA]	$T_{L \rightarrow H}$ [ps] (Analytical Equation)	$T_{L \rightarrow H}$ [ps] (HSPICE)	Absolute percentage error %
80	800	108.05	109.55	1.3

Model validation. To prove the effectiveness of the proposed method, assume that there are ten 2-input NAND gates connected one after another as a chain of inverters. The SET strikes on the first NAND gate (Fig.6) with an input voltage $V_{in} = 1.05$ V and $V_{dd} = 1.05$ V. Using the proposed analytical equations, the propagation delay of the entire circuit can be evaluated by equation (6) [8]:

$$T_{PD} = \left(\frac{T_{PD_{L \rightarrow H}} + T_{PD_{H \rightarrow L}}}{2} \right) + 9 * Avarage(T_{NAND_delay}) \quad (6)$$

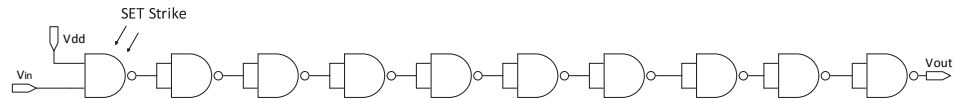


Fig.6. Ten 2-input NAND gates connected to each other as a chain of inverters exposed to a SET radiation effect

The propagation delay measurement results of the chain of NAND gates exposed to radiation are presented in Table 6. HSPICE simulation and analytical equation evaluation results are presented correspondingly in the “HSPICE T_{PD} ” and “Analytical Equation T_{PD} ” columns.

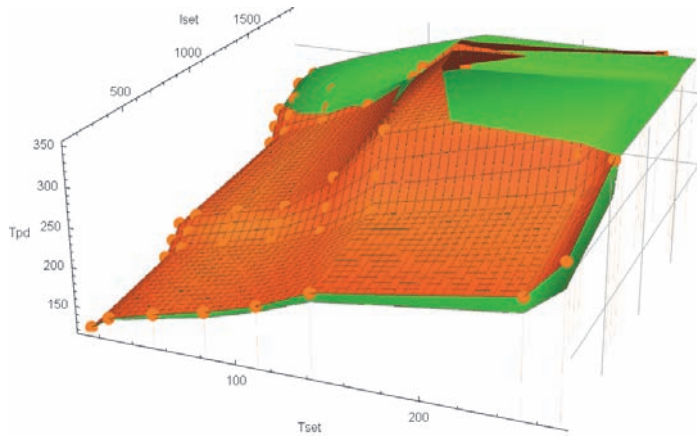


Fig.7. 3D plot comparison of chain of ten NAND gates propagation delay, measured with HSPICE simulation “dotted plot” and with analytical equation (4) “solid plot”

Fig. 7 presents the 3D plot comparison of the chain of NAND gates propagation delay, measured with HSPICE simulation (dotted plot) and with analytical equation (5) (solid plot).

The results obtained from HSPICE simulation and analytical model are listed in Table 6.

Table 6

Ten 2-input NAND chain propagation delays extracted from the Analytical Equation and HSPICE measurements

$T_{SET}[ps]$	$I_{SET}[\mu A]$	HSPICE T_{PD} [ps]	Analytical Equation T_{PD} [ps]
12	140	119.62	119.60
23	677	152.53	147.22
50	740	181.51	174.08
80	800	213.67	202.04
110	1650	257.56	294.66
140	1900	290.38	350.89
250	1600	396.95	342.69
270	1700	418.17	350.70

To prove the accuracy of the analytical model the Mean Absolute Percentage Error has been calculated (MAPE). Using the model proposed in this work, MAPE is equal to 9.76%. This means that the model provides the necessary accuracy to be

used in the design of digital ICs, considering that radiation induces the SET effects to calculate the propagation delay of integrated circuits without the need to run SPICE-like simulations. Moreover, the machine execution times in case of the analytical model and SPICE simulation are compared. HSPICE simulations and modeling of the particle strike at NAND gates chain, takes more than 3 minutes. While using the analytical equations, the evaluation time of the propagation delay is less than 30 seconds. This shows that by using the proposed model, the design of a radiation-hardened integrated circuit can be sped up for more than 6 times.

Conclusion. An accurate and efficient analytical model for determining the digital element's propagation delay dependency on the single event transient effect (SET) is proposed. By using the model, the propagation delay of digital elements can be calculated without circuit level simulations. The SET generation through logic gates is modelled based on TCAD simulation and statistical data.

The Comparison of the results obtained by the model, with circuit level simulation results shows that, the delay calculation using the proposed analytical model is close to HSPICE simulation results. The accuracy of the model is 90.3% and the design of radiation-hardened digital IC can be sped up for more than 6 times. The model validation results prove that this analytical model is suitable to be used in digital IC design flow for determination of the CMOS circuit sensitivity to radiation-induced SETs.

REFERENCES

1. **Wirth G.I., Vieira M.G., Neto E.H.** Modeling the sensitivity of CMOS circuits to radiation-induced single event transients // *Microelectronics reliability*.-2008. - P.29-36.
2. Single-Event Upset Analysis and Protection in High Speed Circuits / **M. Hosseinabady, P. Lotfi-Kamran, G.D. Natale, et al** // Eleventh IEEE European Test Symposium (ETS'06).- 2006. - P.29-34.
3. URL: <http://www.pspice.com/resources/application-notes/radiation-effect-modeling> (access date: 04.05.2019)
4. **Calienes Bartra W. E., Vladimirescu A., Reis R.** Bulk and FDSOI Sub-micron CMOS Transistors Resilience to Single-Event Transients // 2015 IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems (ICECS).- 2015. - P. 133-136.
5. Single event transients mitigation techniques for CMOS integrated VCOs / **D.G. Ramírez, S.L. Khemchandani, J. del Pino, et al** // *Microelectronics Journal*.-2006. - P. 76-82.
6. HSPICE Reference Manual. - Synopsys Inc., 2017. -846p.
7. Wolfram Research, Inc., Mathematica. Version 11.3.- Champaign, IL 2018.
8. **Razavi B.** Design of analog CMOS integrated circuits.- McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering, Singapore, 2005. –684 p.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 15.04.2019.

Ա.Ա. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Գ.Ա. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ՌԱԴԻԱՑԻՈՆ ԸԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՀԱՇՎԻ ԱՌՆՈՂ ԹՎԱՅԻՆ ՏԱՐՐԻ ՀԱՊԱՂՈՒՄՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՄՈՂԵԼ

Առաջարկվում է ինտեգրալ սխեմաներում (ԻՍ) տրամաբանական տարրերի հապաղումների հաշվարկման նոր մոդել՝ հաշվի առնելով ռադիատցիոն ճառագայթման արդյունքում առաջացած եզակի պատահարի ժամանակային անցման երևույթը (ԵՊԺԱ): Աշխատանքի նպատակն է ԻՍ-ում տրամաբանական տարրերի հապաղման ժամանակի որոշումը՝ առանց տրանզիստորների մակարդակի մոդելավորման: Հապաղման ժամանակի որոշման նպատակով արտածվել են վերլուծական բանաձևեր: Վերլուծական բանաձևերի և HSPICE տրանզիստորների մակարդակի մոդելավորման միջոցի օգտագործմամբ չափվել է «ԵՎ-ՈՉ» տրամաբանական տարրերից բաղկացած շղթայի հապաղման ժամանակը: Առաջարկվող մոդելի և HSPICE տրանզիստորների մակարդակի մոդելավորման միջոցի արդյունքների համեմատությունը ցույց է տվել մոդելի 90.3% ճշգրտությունը: Մոդելը կարող է կիրառվել ժամանակակից ռադիացիոն ճառագայթման նկատմամբ կայուն ԻՍ-երի նախագծման գործնականում:

Առանցքային բառեր. եզակի պատահարի ժամանակային անցման երևույթ, ԿՄՕԿ, հապաղման ժամանակ, վերլուծական բանաձև, եզակի պատահարի խափանում, անցողիկ սխալներ, էներգիայի գծային փոխանցում, ռադիացիոն ճառագայթման երևույթ:

Ա.Ա. ПЕТРОСЯН, Г.А. ПЕТРОСЯН

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЗАДЕРЖКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА ЦИФРОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Представлена модель для расчета задержки распространения сигнала цифровых элементов с учетом радиационных кратковременных переходных процессов. Основная цель данной работы заключается в определении задержки распространения сигнала цифровых элементов в интегральных схемах (ИС) без потребности моделирования на схематическом уровне. Выявлены аналитические уравнения для вычисления задержки распространения логических элементов. Измерены задержка распространения цепочки И-НЕ с помощью аналитических уравнений и симуляции на схематическом уровне с помощью инструмента HSPICE. Сравнение результатов измерений показывает, что созданная модель обеспечивает расчет задержки распространения цифровых элементов с точностью до 90,3%. Эта модель может быть интегрирована в процесс проектирования радиационно-устойчивых ИС.

Ключевые слова: кратковременные переходные процессы, система автоматизированного проектирования (САПР), комплементарная структура металл-оксид-полупроводник (КМОП), аналитические уравнения, одиночные ионизирующие частицы, мягкие ошибки, линейная передачи энергии, задержки распространения сигнала, радиационный эффект.

С.О. СИМОНЯН

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ АНАЛОГ МЕТОДА А.Н. КРЫЛОВА ДЛЯ
РЕШЕНИЯ ПОЛНОЙ ПРОБЛЕМЫ СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ -
ФУНКЦИЙ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЦ**

Предложен дифференциальный аналог метода А.Н. Крылова для решения полной проблемы собственных значений-функций однопараметрических матриц. Получено необходимое и достаточное условие однозначной разрешимости задачи. Рассмотрено решение одного модельного примера, демонстрирующее вычислительную эффективность предложенного дифференциального аналога.

Ключевые слова: полная проблема собственных значений-функций, метод А.Н. Крылова, однопараметрические матрицы, дифференциальные преобразования, дифференциальный аналог, модельный пример.

Введение. Известно много методов для решения полной проблемы собственных значений числовых матриц, например [1-4]. Среди них особое место занимает метод А.Н. Крылова, обладающий простотой и эффективностью вычислительных процедур.

Дифференциальные аналоги ряда методов для решения полной проблемы собственных значений-функций однопараметрических матриц, основанные на дифференциальных преобразованиях [5], предложены в монографии [6] (например, регулярный численно-аналитический метод с явными и неявными вычислительными схемами, метод Жирара-Виета для параллельного определения всех корней алгебраических многочленов с переменными коэффициентами, метод фон-Мизеса (для решения частной проблемы собственных значений-функций), $QR^{ДП}$ -аналог определения комплексных собственных значений-функций однопараметрических матриц).

В настоящей работе предлагается дифференциальный численно-аналитический аналог метода А.Н. Крылова для решения полной проблемы собственных значений-функций однопараметрических матриц $A(t)$ порядка n , основанный на дифференциальных преобразованиях [5, 6].

Математический аппарат

1. Согласно методу А.Н. Крылова [3], для матрицы $A_{n \times n}$ берётся произвольный начальный вектор $C_0 = (c_{01}, \dots, c_{0n})^T$ и по рекуррентному соотношению

$$C_i = A \cdot C_{i-1}, \quad i = \overline{1, n} \quad (1)$$

строится конечная последовательность векторов-столбцов

$$C_1 = A \cdot C_0 = (c_{11}, \dots, c_{1n})^T, \quad (2)$$

$$C_2 = A \cdot C_1 = (c_{21}, \dots, c_{2n})^T, \quad (3)$$

.....

$$C_n = A \cdot C_{n-1} = (c_{n1}, \dots, c_{nn})^T. \quad (4)$$

Далее составляется линейная неоднородная система конечных уравнений

$$C_{n-1} \cdot P_1 + C_{n-2} \cdot P_2 + \dots + C_1 \cdot P_{n-1} + C_0 \cdot P_n = C_n \quad (5)$$

с невырожденной матрицей

$$C = [C_{n-1}, C_{n-2}, \dots, C_1, C_0] \quad (6)$$

(т.е. при условии

$$\text{rang } C = n) \quad (7)$$

и n -мерным вектором-столбцом

$$P = (P_1, \dots, P_n)^T. \quad (8)$$

Иначе говоря, строится система

$$C \cdot P = C_n, \quad (9)$$

в которой, как оказывается, элементы вектора (8) точно совпадают с коэффициентами собственного многочлена матрицы A . Таким образом, легко строится характеристическое уравнение матрицы A

$$P(\lambda) = \lambda^n + P_1 \cdot \lambda^{n-1} + P_2 \cdot \lambda^{n-2} + \dots + P_{n-1} \cdot \lambda + P_n = 0, \quad (10)$$

затем находятся корни $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}, \lambda_n$ этого уравнения или, что одно и то же, все собственные числа матрицы A .

Если при выборе некоторого произвольного начального вектора C_0 условие (7) полноранговости матрицы C нарушается, т.е. имеет место условие

$$\text{rang } C < n, \quad (11)$$

то при этом используется аппарат минимальных аннулирующих многочленов [3], при которых решается частная проблема собственных значений. Использование некоторого множества произвольных начальных векторов C_0 в итоге также приводит к решению полной проблемы собственных значений, однако при сравнительно большом объеме вычислительных процедур.

Утверждение 1. Вне зависимости от выбора произвольного начального вектора C_0 , соотношение (7) является необходимым и достаточным условием однозначной разрешимости полной проблемы собственных значений матрицы A .

2. Теперь рассмотрим полную проблему собственных значений-функций однопараметрических матриц $A(t)$ порядка n . Естественно, при этом произвольный начальный вектор $C_0(t) = (c_{01}(t), \dots, c_{0n}(t))^T$ и соотношения (1)-(11) остаются в силе с точностью до однопараметрических векторов-столбцов $C_i(t)$, $P_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ собственных значений-функций $\lambda_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ и матрицы $C(t)$. Далее, имея в виду последнее обстоятельство и допустив, что при этом имеют место следующие дифференциальные преобразования [5, 6]:

$$A(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K A(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad A(t) = \chi_1(t, t_v, H, A(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (12)$$

$$C_i(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K C_i(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad C_i(t) = \chi_2(t, t_v, H, C_i(K), K = \overline{0, \infty}), \quad i = \overline{0, n}, \quad (13)$$

$$C(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K C(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad C(t) = \chi_3(t, t_v, H, C(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (14)$$

$$P_i(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K P_i(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad P_i(t) = \chi_4(t, t_v, H, P_i(K), K = \overline{0, \infty}), \quad i = \overline{1, n}, \quad (15)$$

$$P(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K P(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad P(t) = \chi_5(t, t_v, H, P(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (16)$$

$$\lambda_i(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K \lambda_i(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \lambda_i(t) = \chi_6(t, t_v, H, \lambda_i(K), K = \overline{0, \infty}), \quad i = \overline{1, n} \quad (17)$$

(где $A(K)$ и $C(K)$, $K = \overline{0, \infty}$ - матричные дискреты матриц $A(t)$ и $C(t)$ соответственно; $C_i(K)$ и $P_i(K)$, $K = \overline{0, \infty}$, $i = \overline{1, n}$ - векторные дискреты векторов $C_i(t)$ и $P_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ соответственно; $\lambda_i(K)$, $K = \overline{0, \infty}$, $i = \overline{1, n}$ - дискреты собственных значений-функций $\lambda_i(t)$, $i = \overline{1, n}$; $K = \overline{0, \infty}$ - целочисленный

аргумент; H – масштабный коэффициент; символ $\overline{\cdot}$ – знак перехода из области оригиналов в область дифференциальных изображений и наоборот; $\chi_1(\cdot), \dots, \chi_6(\cdot)$ – некоторые аппроксимирующие функции, восстанавливающие оригиналы $A(t)$, $C_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, $C(t)$, $P_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, $P(t)$ и $\lambda_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ соответственно), перейдем к соответствующему дифференциальному аналогу решения рассматриваемой проблемы.

Аналогичное (1) однопараметрическое соотношение из области оригиналов переведем в область дифференциальных изображений. При этом, согласно алгебре дифференциальных преобразований, будем иметь представление

$$C_i(K) = \sum_{l=0}^K A(l) \cdot C_{i-1}(K-l), \quad K = \overline{0, \infty}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (18)$$

Точно так же, в соответствии с (9) получим представление

$$C_n(K) = \sum_{l=0}^K C(\ell) \cdot P(K-l), \quad K = \overline{0, \infty}, \quad (19)$$

откуда, определив векторные дискреты $P(K)$, $K = \overline{0, \infty}$, в соответствии с некоторым обратным дифференциальным преобразованием (16) можно определить и вектор $P(t)$. В частности, при маклореновском и тейлоровском дифференциальных преобразованиях будем иметь представления

$$P(t) = \sum_{K=0}^{\infty} P(K) \cdot t^K, \quad (20)$$

$$P(t) = \sum_{K=0}^{\infty} P(K) \cdot (t - t_v)^K \quad (21)$$

соответственно.

Далее, имея коэффициенты-функции $P_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, в соответствии с (10) получим аналогичное представление

$$P(\lambda(t), t) = \lambda^n(t) + P_1(t) \cdot \lambda^{n-1}(t) + P_2(t) \cdot \lambda^{n-2}(t) + \dots + P_{n-1}(t) \cdot \lambda + P_n(t) = 0. \quad (22)$$

Определение собственных значений-функций матрицы $A(t)$ (или корней этого характеристического уравнения) можно осуществить также на основе дифференциальных преобразований, в частности, используя явную или неявную вычислительные схемы, предложенные в [5, с. 130, 131].

Утверждение 2. Вне зависимости от выбора произвольного начального вектора $C_0(t)$ (который, в частности, может обладать и постоянными компонентами), аналогичное (7) соотношение

$$\text{rang } C = n \quad (23)$$

является необходимым и достаточным условием однозначной разрешимости полной проблемы собственных значений-функций однопараметрической матрицы $A(t)_{n \times n}$.

Модельный пример. Рассмотрим задачу определения собственных значений – функций однопараметрической матрицы

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

При $t_v = 0$, $H = 1$, очевидно, она обладает матричными дискретами

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

$$A(K) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \forall K \geq 3.$$

Первый этап вычислений ($i = 1$)

Имеем

$$A(t) \cdot C_0(t) = C_1(t),$$

откуда, например, выбрав $C_0(t) = (3, 2, 1)^T$, получим:

при $K=0$:

$$C_1(0) = A(0) \cdot C_0(0) = (4, 0, 0)^T;$$

при $K=1$:

$$C_1(1) = A(1) \cdot C_0(0) + A(0) \cdot \overset{0}{\cancel{C_0(1)}} = (5, 2, 2)^T;$$

при $K=2$:

$$C_1(2) = A(2) \cdot C_0(0) + A(1) \cdot \cancel{C_0(1)}^0 + A(0) \cdot \cancel{C_0(2)}^0 = (3, 0, -1)^T;$$

при $K=3$:

$$C_1(3) = \cancel{A(3)}^0 \cdot C_0(0) + A(2) \cdot \cancel{C_0(1)}^0 + A(1) \cdot \cancel{C_0(2)}^0 + A(0) \cdot \cancel{C_0(3)}^0 = (0, 0, 0)^T$$

и т.д.

Следовательно, маклореновское представление $C_1(t)$ имеет вид

$$C_1(t) = \begin{pmatrix} (4 + 5 \cdot t + 3 \cdot t^2) \\ 2 \cdot t \\ (2 \cdot t - t^2) \end{pmatrix}.$$

Второй этап вычислений ($i = 2$)

Имеем

$$C_2(t) = A(t) \cdot C_1(t),$$

откуда:

при $K=0$:

$$C_2(0) = A(0) \cdot C_1(0) = (8, -4, 0)^T;$$

при $K=1$:

$$C_2(1) = A(1) \cdot C_1(0) + A(0) \cdot C_1(1) = (4, 4, 0)^T + (8, -3, 2)^T = (12, 1, 2)^T;$$

при $K=2$:

$$\begin{aligned} C_2(2) &= A(2) \cdot C_1(0) + A(1) \cdot C_1(1) + A(0) \cdot C_1(2) = \\ &= (4, 0, 0)^T + (7, 5, 2)^T + (6, -2, -2)^T = (17, 3, 0)^T; \end{aligned}$$

при $K=3$:

$$C_2(3) = \cancel{A(3)}^0 \cdot C_1(0) + A(2) \cdot C_1(1) + A(1) \cdot C_1(2) + \cancel{A(0)}^0 \cdot \cancel{C_1(3)}^0 = \\ = (5, 0, -2)^T + (3, 2, 0)^T = (8, 2, -2)^T;$$

при $K=4$:

$$C_2(4) = \cancel{A(4)}^0 \cdot C_1(0) + \cancel{A(3)}^0 \cdot C_1(1) + A(2) \cdot C_1(2) + \cancel{A(1)}^0 \cdot \cancel{C_1(3)}^0 + \cancel{A(0)}^0 \cdot \cancel{C_1(4)}^0 = \\ = (3, 0, 1)^T;$$

при $K=5$:

$$C_2(5) = \cancel{A(5)}^0 \cdot C_1(0) + \cancel{A(4)}^0 \cdot C_1(1) + \cancel{A(3)}^0 \cdot C_1(2) + \cancel{A(2)}^0 \cdot \cancel{C_1(3)}^0 + \cancel{A(1)}^0 \cdot \cancel{C_1(4)}^0 + \\ + \cancel{A(0)}^0 \cdot \cancel{C_1(5)}^0 = (0, 0, 0)^T$$

и т.д.

Следовательно, маклореновское представление $C_2(t)$ имеет вид

$$C_2(t) = \begin{pmatrix} (8 + 12 \cdot t + 17 \cdot t^2 + 8 \cdot t^3 + 3 \cdot t^4) \\ (-4 + t + 3 \cdot t^2 + 2 \cdot t^3) \\ (2 \cdot t + 0 \cdot t^2 - 2t^3 + t^4) \end{pmatrix}.$$

Третий этап вычислений ($i=3$)

Имеем

$$C_3(t) = A(t) \cdot C_2(t),$$

откуда:

при $K=0$:

$$C_3(0) = A(0) \cdot C_2(0) = (20, -16, 4)^T;$$

при $K=1$:

$$C_3(1) = A(1) \cdot C_2(0) + A(0) \cdot C_2(1) = (4, 12, -4) + (23, -12, 3) = (27, 0, -1)^T;$$

при $K=2$:

$$\begin{aligned} C_3(2) &= A(2) \cdot C_2(0) + A(1) \cdot C_2(1) + A(0) \cdot C_2(2) = \\ &= (8, 0, 0)^T + (13, 13, 1)^T + (31, -11, -3)^T = (52, 2, -2)^T; \end{aligned}$$

при $K=3$:

$$\begin{aligned} C_3(3) &= \cancel{A(3)}^0 \cdot C_2(0) + A(2) \cdot C_2(1) + A(1) \cdot C_2(2) + A(0) \cdot C_3(3) = \\ &= (12, 0, -2)^T + (20, 14, 3)^T + (14, -2, -6)^T = (46, 12, -5)^T; \end{aligned}$$

при $K=4$:

$$\begin{aligned} C_3(4) &= \cancel{A(4)}^0 \cdot C_2(0) + \cancel{A(3)}^0 \cdot C_2(1) + A(2) \cdot C_2(2) + A(1) \cdot C_2(3) + A(0) \cdot C_2(4) = \\ &= (17, 0, 0)^T + (10, 4, 2)^T + (6, -4, 2)^T = (33, 0, 4)^T; \end{aligned}$$

при $K=5$:

$$\begin{aligned} C_3(5) &= \cancel{A(5)}^0 \cdot C_2(0) + \cancel{A(4)}^0 \cdot C_2(1) + \cancel{A(3)}^0 \cdot C_2(2) + A(2) \cdot C_2(3) + \\ &+ A(1) \cdot C_2(4) + \cancel{A(0)}^0 \cdot C_2(5) = (8, 0, 2)^T + (3, 4, 0)^T = (11, 4, 2)^T; \end{aligned}$$

при $K=6$:

$$\begin{aligned} C_3(6) &= \cancel{A(6)}^0 \cdot C_2(0) + \cancel{A(5)}^0 \cdot C_2(1) + \cancel{A(4)}^0 \cdot C_2(2) + \cancel{A(3)}^0 \cdot C_2(3) + \\ &+ A(2) \cdot C_2(4) + \cancel{A(1)}^0 \cdot C_2(5) + \cancel{A(0)}^0 \cdot C_2(6) = (3, 0, -1)^T; \end{aligned}$$

при $K=7$:

$$C_3(7) = \overset{0}{\cancel{A(7)}} \cdot C_2(0) + \overset{0}{\cancel{A(6)}} \cdot C_2(1) + \overset{0}{\cancel{A(5)}} \cdot C_2(2) + \overset{0}{\cancel{A(4)}} \cdot C_2(3) + \overset{0}{\cancel{A(3)}} \cdot C_2(4) + \\ + \overset{0}{\cancel{A(2)}} \cdot C_2(5) + \overset{0}{\cancel{A(1)}} \cdot C_2(6) + \overset{0}{\cancel{A(0)}} \cdot C_2(7) = (0, 0, 0)^T$$

и т.д.

Следовательно, маклореновское представление $C_3(t)$ имеет вид

$$C_3(t) = \begin{pmatrix} (20 + 27 \cdot t + 52 \cdot t^2 + 46 \cdot t^3 + 33 \cdot t^4 + 11 \cdot t^5 + 3 \cdot t^6) \\ (-16 + 2 \cdot t^2 + 12 \cdot t^3 + 4 \cdot t^5) \\ (4 - t - 2 \cdot t^2 - 5 \cdot t^3 + 4 \cdot t^4 + 2 \cdot t^5 - t^6) \end{pmatrix}.$$

Четвертый этап вычислений

Построим в соответствии с (9) систему уравнений

$$\begin{bmatrix} (8 + 12 \cdot t + 17 \cdot t^2 + 8 \cdot t^3 + 3 \cdot t^4) & (4 + 5 \cdot t + 3 \cdot t^2) & 3 \\ (-4 + t + 3 \cdot t^2 + 2 \cdot t^3) & 2 \cdot t & 2 \\ (2t - 2 \cdot t^3 + t^4) & (2 \cdot t - t^2) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} (20 + 27 \cdot t + 52 \cdot t^2 + 46 \cdot t^3 + 33 \cdot t^4 + 11 \cdot t^5 + 3 \cdot t^6) \\ (-16 + 2 \cdot t^2 + 12 \cdot t^3 + 4 \cdot t^5) \\ (4 - t - 2 \cdot t^2 - 5 \cdot t^3 + 4 \cdot t^4 + 2 \cdot t^5 - t^6) \end{pmatrix},$$

откуда имеем матричные дискреты

$$C(0) = \begin{bmatrix} 8 & 4 & 3 \\ -4 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C(1) = \begin{bmatrix} 12 & 5 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 0 \end{bmatrix}, \quad C(2) = \begin{bmatrix} 17 & 3 & 0 \\ 3 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C(3) = \begin{bmatrix} 8 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C(4) = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C(5) = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C(6) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C^{-1}(0) = \begin{bmatrix} 0 & -0,25 & 0,5 \\ 0,25 & 0,5 & -1,75 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

и векторные дискреты

$$C_3(0) = (20, -16, 4)^T, \quad C_3(1) = (27, 0, -1)^T, \quad C_3(2) = (52, 2, -2)^T, \quad C_3(3) = (46, 12, -5)^T, \\ C_3(4) = (33, 0, 4)^T, \quad C_3(5) = (11, 4, 2)^T, \quad C_3(6) = (3, 0, -1)^T, \quad C_3(K) = (0, 0, 0)^T, \quad \forall K \geq 7.$$

Следовательно,

при $K=0$:

$$C_3(0) = C(0) \cdot P(0),$$

откуда

$$(P_1(0), P_2(0), P_3(0))^T = (6, -10, 4)^T;$$

при $K=1$:

$$C_3(1) = C(1) \cdot P(0) + C(0) \cdot P(1),$$

откуда

$$(P_1(1), P_2(1), P_3(1))^T = (0, -4, 7)^T;$$

при $K=2$:

$$C_3(2) = C(2) \cdot P(0) + C(1) \cdot P(1) + C(0) \cdot P(2),$$

откуда

$$(P_1(2), P_2(2), P_3(2))^T = (0, 3, -4)^T;$$

при $K=3$:

$$C_3(3) = C(3) \cdot P(0) + C(2) \cdot P(1) + C(1) \cdot P(2) + C(0) \cdot P(3),$$

откуда

$$(P_1(3), P_2(3), P_3(3))^T = (0, 1, -3)^T;$$

при $K=4$:

$$C_3(4) = C(4) \cdot P(0) + C(3) \cdot P(1) + C(2) \cdot P(2) + C(1) \cdot P(3) + C(0) \cdot P(4),$$

откуда

$$(P_1(4), P_2(4), P_3(4))^T = (0, 1, -1)^T;$$

при $K=5$:

$$C_3(5) = \overset{0}{\cancel{C(5)}} \cdot P(0) + C(4) \cdot P(1) + C(3) \cdot P(2) + C(2) \cdot P(3) + C(1) \cdot P(4) + C(0) \cdot P(5),$$

откуда

$$(P_1(5), P_2(5), P_3(5))^T = (0, 0, 1)^T;$$

при $K=6$:

$$C_3(6) = \overset{0}{\cancel{C(6)}} \cdot P(0) + \overset{0}{\cancel{C(5)}} \cdot P(1) + C(4) \cdot P(2) + C(3) \cdot P(3) + C(2) \cdot P(4) + \\ + C(1) \cdot P(5) + C(0) \cdot P(6),$$

откуда

$$(P_1(6), P_2(6), P_3(6))^T = (0, 0, 0)^T$$

и т.д.

Следовательно, маклореновское представление векторов коэффициентов $P(t)$ в соответствии с (20) имеет вид

$$P(t) = \begin{pmatrix} 6 \\ (-10 - 4 \cdot t + 3 \cdot t^2 + t^3 + t^4) \\ (4 + 7 \cdot t - 4 \cdot t^2 - 3t^3 - t^4 + t^5) \end{pmatrix},$$

а характеристическое уравнение матрицы $A(t)$:

$$P(\lambda(t), t) = (-1)^3 \cdot [\lambda^3(t) - 6 \cdot \lambda^2(t) - (-10 - 4 \cdot t + 3 \cdot t^2 + t^3 + t^4) \cdot \lambda(t) - \\ - (4 + 7 \cdot t - 4t^2 - 3t^3 - t^4 + t^5)] = 0.$$

Нетрудно убедиться, что точно к такому же результату приводит метод непосредственного разворачивания определителя рассматриваемой матрицы, т.е. $\det[A(t) - \lambda(t) \cdot E] = 0$.

Пятый этап вычислений

Теперь, используя явную схему [5,с.131], вычислим дискреты $\lambda_1(K)$, $\lambda_2(K)$, $\lambda_3(K)$, $K = \overline{0, 2}$, используя последнее характеристическое уравнение.

Имеем:

при $K=0$:

$$P(\lambda(t), t) \big|_{t_v=0} = \lambda^3(0) - 6 \cdot \lambda^2(0) + 10 \cdot \lambda(0) - 4 = 0,$$

откуда

$$\lambda_1(0) = 2, \quad \lambda_2(0) = 2 + \sqrt{2}, \quad \lambda_3(0) = 2 - \sqrt{2};$$

при $K=1$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(\lambda(t), t)}{\partial t} \bigg|_{t_v=0} &= 3 \cdot \lambda^2(t) \cdot \frac{d\lambda(t)}{dt} - 12 \cdot \lambda(t) \cdot \frac{d\lambda(t)}{dt} - (-4 + 6 \cdot t + 3 \cdot t^2 + 4 \cdot t^3) \cdot \lambda(t) - \\ &- (-10 - 4 \cdot t + 3 \cdot t^2 + t^3 + t^4) \cdot \frac{d\lambda(t)}{dt} - (7 - 8t - 9 \cdot t^2 - 4 \cdot t^3 + 5 \cdot t^4) \bigg|_{t_v=0} = \\ &= 3 \cdot \lambda^2(0) \cdot \lambda(1) - 12 \cdot \lambda(0) \cdot \lambda(1) + 4 \cdot \lambda(0) + 10 \cdot \lambda(1) - 7 = 0, \end{aligned}$$

откуда

$$\lambda_1(1) = 0,5; \quad \lambda_2(1) = -0,25 - \sqrt{2}; \quad \lambda_3(1) = -0,25 + \sqrt{2};$$

при $K=2$:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial^2 P(\lambda(t), t)}{\partial t^2} \bigg|_{t_v=0} &= 6 \cdot \lambda(t) \cdot \frac{d\lambda(t)}{dt} + 3 \cdot \lambda^2(t) \cdot \frac{d^2\lambda(t)}{dt^2} - 12 \cdot \frac{d\lambda(t)}{dt} - 12 \cdot \lambda(t) \cdot \frac{d^2\lambda(t)}{dt^2} - \\ &- (6 + 6 \cdot t + 12 \cdot t^2) \cdot \lambda(t) - (-4 + 6 \cdot t + 3 \cdot t^2 + 4 \cdot t^3) \cdot \frac{d\lambda(t)}{dt} - \\ &- (-4 + 6 \cdot t + 3 \cdot t^2 + 4 \cdot t^3) \cdot \frac{d\lambda(t)}{dt} - (-10 - 4 \cdot t + 3 \cdot t^2 + t^3 + t^4) \cdot \frac{d^2\lambda(t)}{dt^2} - \\ &- (7 - 8 \cdot t - 9 \cdot t^2 - 4 \cdot t^3 + 5 \cdot t^4) \bigg|_{t_v=0} = \\ &= 6 \cdot \lambda(0) \cdot \lambda(1) + 3 \cdot \lambda^2(0) \cdot \lambda(2) - 12 \cdot \lambda(1) - 12 \cdot \lambda(0) \cdot \lambda(2) - \\ &- 6 \cdot \lambda(0) + 4 \cdot \lambda(1) + 4 \cdot \lambda(1) + 10 \cdot \lambda(2) - 7 = \\ &= (3 \cdot \lambda^2(0) - 12 \cdot \lambda(0) + 10) \cdot \lambda(2) + (6 \cdot \lambda(0) - 4) \cdot \lambda(1) - (6 \cdot \lambda(0) + 7) = 0, \end{aligned}$$

откуда

$$\lambda_1(2) = -7,5; \quad \lambda_2(2) = 8,25 + 3,875 \cdot \sqrt{2}; \quad \lambda_3(2) = 8,25 - 3,875 \cdot \sqrt{2}$$

и т.д.

Ограничимся первыми тремя найденными дискретами для всех собственных значений-функций. При этом будем иметь следующие приближенные собственные значения-функции:

$$\begin{aligned}\lambda_1(t) &= 2 + 0,5 \cdot t - 7,5 \cdot t^2 + \dots, \\ \lambda_2(t) &= (2 + \sqrt{2}) - (0,25 + \sqrt{2}) \cdot t + (8,25 + 3,875 \cdot \sqrt{2}) \cdot t^2 + \dots, \\ \lambda_3(t) &= (2 - \sqrt{2}) - (0,25 - \sqrt{2}) \cdot t + (8,25 - 3,875 \cdot \sqrt{2}) \cdot t^2 + \dots.\end{aligned}$$

Таким образом, решена полная проблема собственных значений-функций матрицы $A(t)$ при выполнении условия полноранговости матрицы $C(0)$, т.е. при $\text{rang } C(0)=3$. При невыполнении последнего условия, т.е. при $\text{rang } C(0)<3$, пришлось бы воспользоваться аппаратом минимальных аннулирующих многочленов, решающим частную проблему собственных значений-функций. Так, например, при выборе произвольного вектора $C_0(t) = (1, (1+t), (1-t))^T$ получаем матрицу

$$C(0) = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ -2 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

с рангом

$$\text{rang } C(0)=2 \leq 3$$

и минимальным аннулирующим многочленом второго порядка, позволяющим определять начальные дискреты

$$\begin{aligned}\lambda_2(0) &= 2 + \sqrt{2}, \\ \lambda_3(0) &= 2 - \sqrt{2},\end{aligned}$$

а при выборе произвольного начального вектора $C_0(t) = (1; 0; -1)^T$ – матрицу

$$C(0) = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -4 & -2 & -1 \end{bmatrix},$$

с рангом

$$\text{rang } C(0)=1 < 3$$

и минимальным аннулирующим многочленом первого порядка, позволяющим определять начальную дискрету

$$\lambda_1(0) = 2.$$

Ход вычислительных процедур по определению последующих дискретов и собственных значений-функций, естественно, аналогичен уже рассмотренному.

Заключение. Таким образом, для решения полной проблемы собственных значений-функций однопараметрических матриц предложен дифференциальный аналог метода А.Н. Крылова, все операции которого эффективно выполняются исключительно на основе использования дифференциальных преобразований Г.Е. Пухова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кублановская В.Н.** О некоторых алгоритмах для решения полной проблемы собственных значений // ЖВМ и МФ. - 1961. - 1, № 4. – С. 555-570.
2. **Уилкинсон Дж.** Алгебраическая проблема собственных значений. – М.: Наука, 1970. – 564 с.
3. **Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырный П.Н.** Вычислительные методы высшей математики / Под ред. И.П. Мысовских. – Минск: Высшая школа, 1972. - Т.1. – 584 с.
4. **Парлетт Б.** Симметричная проблема собственных значений (Численные методы). - М.: Мир, 1983. - 384 с.
5. **Пухов Г.Е.** Дифференциальные преобразования функций и уравнений. - Киев: Наукова думка, 1984. - 420 с.
6. **Симонян С.О., Аветисян А.Г.** Прикладная теория дифференциальных преобразований: Монография. - Ереван: Изд-во ГИУА “Чартарагет”, 2010. - 364 с.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 15.05.2019.

Ս.Հ. ՄԻՄՈՆՅԱՆ

Ա.Ն. ԿՐԻԼՈՎԻ ՄԵԹՈԴԻ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ՆՄԱՆԱԿԸ ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ
ՄԱՏՐԻՑՆԵՐԻ ՍԵՓԱԿԱՆ ԱՐԺԵՔՆԵՐ – ՖՈՆԿՑԻԱՆԵՐԻ ԼՐԻՎ
ՀԻՄՆԱԽՆԴՐԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ՀԱՄԱՐ

Առաջարկվել է Ա.Ն. Կրիլովի մեթոդի դիֆերենցիալ նմանակը՝ միապարամետրական մատրիցների սեփական արժեքներ-ֆունկցիաների լրիվ հիմնախնդրի լուծման համար: Ստացվել է խնդրի միարժեք լուծելիության անհրաժեշտ և բավարար պայմանը: Դիտարկվել է մեկ մոդելային օրինակի լուծումը, որը ցուցադրել է առաջարկված դիֆերենցիալ նմանակի հաշվողական արդյունավետությունը:

Առանցքային բառեր. սեփական արժեքներ-ֆունկցիաների լրիվ հիմնախնդիր, Ա.Ն. Կրիլովի մեթոդ, միապարամետրական մատրիցներ, դիֆերենցիալ ձևափոխություններ, դիֆերենցիալ նմանակ, մոդելային օրինակ:

S.H. SIMONYAN

THE DIFFERENTIAL ANALOGUE OF THE A.N. KRYLOV METHOD
FOR SOLVING THE COMPLETE PROBLEM OF ITS OWN VALUES -
FUNCTIONS OF ONE-PARAMETRIC MATRICES

A differential analogue of the A.N. Krylov method of for solving the complete eigenvalue problem - functions of one-parameter matrices is proposed. A necessary and sufficient condition for the unique solvability of the problem is obtained. A solution of one model example is considered, which demonstrates the computational efficiency of the proposed differential analogue.

Keywords: complete problem of eigenvalues-functions, method A.N. Krylov, one-parametric matrices, differential transformations, differential analogue, model example.

Э.П. АЩИЯНЦ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ОПОРОЖНЕНИЯ ДЮКЕРА**

В гидравлической лаборатории Института водных проблем и гидротехники им. акад. И.В. Егiazарова смонтирована экспериментальная установка дюкера, одна из веток которого вертикальна, а другая имеет небольшой уклон к горизонту. Ветки дюкера изготовлены из прозрачного силиконового шланга малого диаметра, что позволило визуальным путем выявить физику протекания процесса опорожнения дюкера и определить продолжительность его опорожнения. Проведено сопоставление полученных экспериментальных данных с результатами расчетов по существующим формулам.

Ключевые слова: дюкер, участки различного уклона, эксперимент, продолжительность опорожнения.

Введение. Одной из составных частей напорной системы водоснабжения является дюкер, который представляет собой трубопровод, прокладываемый по склонам и дну оврагов. В соответствии с рельефом местности нисходящая и восходящая ветки дюкера могут иметь участки различного уклона.

В процессе эксплуатации дюкера возникает необходимость его опорожнения. С этой целью на дюкере у отметки местности, обеспечивающей его полное опорожнение, монтируется водовыпуск с задвижкой.

Нестационарное движение жидкости, возникающее в ветках дюкера при его опорожнении, изучено недостаточно для надежного проектирования напорных систем водоснабжения. Анализ существующих исследований [1-4] показывает, что в них недостаточно изучена динамика движения колонн жидкости в ветках дюкера при его опорожнении, а рекомендуемые зависимости, определяющие параметры движения этих колонн, не обеспечивают необходимую точность расчета и нуждаются в усовершенствовании.

Отсутствие современного опытного материала в существующей технической литературе не позволяет оценить корректность рекомендуемых в работах [1,2,4] формул.

Постановка задачи и методы исследования. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование процесса опорожнения дюкера, одна из веток которого вертикальна, а другая имеет небольшой уклон к горизонту.

Для проведения исследований в гидравлической лаборатории Института водных проблем и гидротехники им. акад. И.В. Егiazарова смонтирована установка, схема которой показана на рис.1. Дюкер состоит из наклонной ветки 1, представляющей собой прозрачный силиконовый шланг диаметром $d=0,014$ м, общей длиной $AC=4,3$ м. Участок АВ этой ветки прямолинейный. Угол наклона его к горизонту $\alpha_1 = 18^\circ$.

Конец ветки AC подсоединен к прямоугольному тройнику 2 с водовыпуском 3, диаметр которого $d_6 = 0,015$ м.

Концевой участок ветки AC криволинейен и имеет длину $BC=0,28$ м.

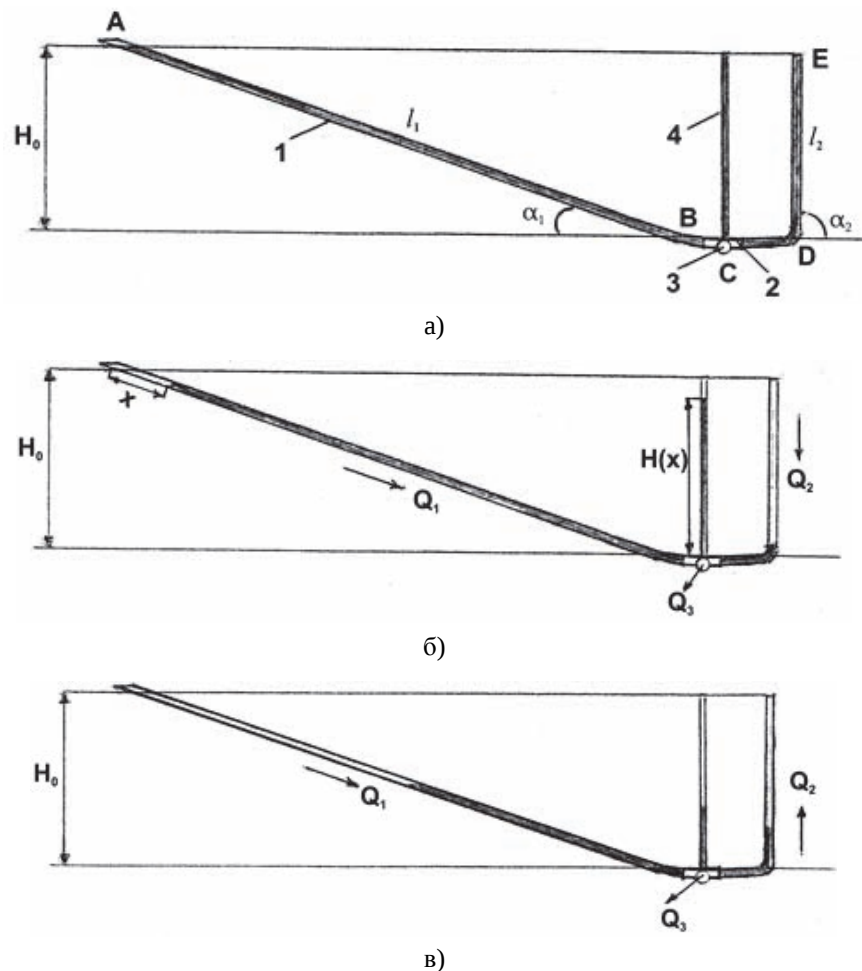


Рис. 1. Схема лабораторной установки (а); положение свободной поверхности воды в ветках дюкера спустя 0,6 с после открытия водовыпуска (б); переток воды из левой ветки дюкера в правую с одновременным опорожнением воды через водовыпуск (в)

Правая ветка дюкера ЕС длиной 1,5 м имеет вертикальный участок ED длиной $l_2 = 1,23$ м. Она так же, как и левая ветка AC, изготовлена из прозрачного силиконового шланга диаметром $d=0,014$ м. Криволинейный участок этой ветки CD=0,27 м. Конец этой ветки также подсоединен к тройнику 2 (рис.1 а). В начале водовыпуска тройника 2 установлен пьезометр 4 диаметром 3 мм.

Превышение свободной поверхности воды H_0 в ветках дюкера при его полном заполнении над осью водовыпуска 3 составляло 1,27 м.

Для проведения экспериментов при помощи резиновой пробки вначале закрывалось отверстие водовыпуска 3, и дюкер полностью заполнялся водой (рис.1 а). После его заполнения пробка быстро удалялась, и осуществлялось визуальное наблюдение за изменением уровней свободных поверхностей воды в ветках дюкера и в пьезометре 4. На рис.1 б показано положение уровней свободной поверхности воды в ветках дюкера спустя примерно 0,6 с после открытия водовыпуска 3. Как видно из рисунка, за указанный промежуток времени вертикальный участок ED правой ветки дюкера полностью опорожнялся, а в левой ветке уровень свободной поверхности воды, так же, как и в пьезометре 4, опускался незначительно. Затем начинался переток воды из левой ветки дюкера в правую с одновременным удалением ее через водовыпуск 3 в атмосферу (рис.1 в). В результате направление движения воды в правой ветке менялось на противоположное, и уровень свободной поверхности воды в вертикальном участке ED повышался на 26...28 см.

После вторичной остановки движения колонны воды в правой ветке направление ее движения менялось на противоположное, в результате чего имело место одновременное опорожнение воды из левой и правой веток дюкера через тройник 2 и водовыпуск 3.

Опорожнение сопровождалось выравниванием уровней свободной поверхности воды в левой и правой ветках дюкера.

Завершающий этап опорожнения происходил при одинаковых уровнях воды в ветках дюкера.

Следует отметить, что выравнивание уровней воды в ветках дюкера возможно при условии, если скорость опорожнения колонны воды в левой ветке превышает скорость опорожнения колонны воды в правой ветке [2,3]. Такое увеличение скорости опорожнения колонны жидкости в левой ветке дюкера лабораторной установки (рис.1 а) можно объяснить следующими обстоятельствами:

1. Первоначальное быстрое полное опорожнение вертикального участка ED правой ветки (рис.1б) создало перепад давления воды в ветках дюкера, что способствовало перетоку воды из левой ветки в правую через тройник 2 с одновременным удалением ее через водовыпуск 3 в атмосферу.

2. В течение всего процесса опорожнения дюкера направление движения скорости колонны воды в левой ветке AC (рис.1 а) не изменялось, в отличие от направления движения колонны воды в правой ветке, где имели место ее остановки и последующие изменения направления движения.

В работах [1-4] возможность перетока воды из одной ветки дюкера в другую в процессе его опорожнения не рассматривалась. В [1,2] отмечается, что если выпуск воды обслуживает одновременно два прилегающих к нему участка с разными длинами l_1 и l_2 , но с одинаковой высотой наполнения $H_1 = H_2 = H_0$ и одинаковым диаметром, то при условии сохранения в них в процессе опорожнения одинакового уровня жидкости имеют место соотношения

$$Q_3 = Q_1 + Q_2, \quad Q_2 = \frac{l_2}{l_1} Q_1 \quad \text{и} \quad Q_3 = Q_1 \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right), \quad (1)$$

где Q_3 - расход жидкости, вытекающей из водовыпуска; Q_1 и Q_2 - соответственно расход жидкости в левой и правой ветках дюкера (рис.1 а); l_1 и l_2 - соответственно длина левой и правой веток.

Из рис. 1б видно, что в процессе опорожнения вертикального участка ED правой ветки дюкера равенство $Q_3 = Q_1 + Q_2$ выполняется, а два других условия, указанные в (1), не выполняются.

После опорожнения вертикального участка ED и возникновения перетока воды из левой ветки дюкера в правую расход составляет $Q_3 = Q_1 - Q_2$ (рис.1в).

На завершающей стадии опорожнения дюкера справедливы равенства (1).

При проведении экспериментов время опорожнения участков дюкера определялось с некоторой погрешностью с помощью секундомера. Согласно полученным данным, спустя примерно 1,3с с момента опорожнения дюкера переток воды в правую ветку дюкера прекращался. В результате повышение горизонта свободной поверхности воды в ветке ED составляло 0,25...0,27 м. Затем имело место совместное опорожнение веток дюкера, которое продолжалось до полного его опорожнения.

Продолжительность опорожнения прямолинейного участка АВ левой ветки дюкера составляла примерно 4,5 с, а время полного опорожнения дюкера изменялось в пределах 5,2...5,4 с.

Сопоставим полученную экспериментальным путем продолжительность опорожнения дюкера экспериментальной установки (рис.1 а) со временем, полученным по рекомендуемой в работе [4] формуле, которая корректна при условии выполнения всех равенств (1). Формула имеет вид

$$T = 2 \frac{W_1 + W_2}{q_0}, \quad (2)$$

где W_1 и W_2 - объёмы воды в левой и правой ветках дюкера:

$$q_0 = \mu A_g \sqrt{2gH_0} \quad (3)$$

где μ - коэффициент расхода, вытекающего через водовыпуск; A_g - площадь отверстия водовыпуска; H_0 - высота наполнения дюкера.

Коэффициент расхода для μ определяется по формуле [5]

$$\mu = 1 / \sqrt{(1 + \zeta_0) \left(\frac{A_1}{A_g} \right)^2 + \lambda \frac{l_1}{d}}, \quad (4)$$

где ζ_0 - коэффициент гидравлического сопротивления прямоугольного тройника при слиянии потоков воды из двух веток дюкера: $\zeta_0 = 2,5$; A_1 - площадь живого сечения трубопровода левой ветки: $A_1 = 154 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; $A_g = 176,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; λ - коэффициент гидравлического трения трубопровода левой ветки дюкера: $\lambda = 0,028$; d - диаметр трубы левой ветки: $d = 0,014 \text{ м}$; $H_0 = 1,27 \text{ м}$.

Подставляя вышеуказанные численные значения расчетных параметров в (3), получим $q_0 = 264,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$.

Объём воды в дюкере при его полном наполнении равен

$$W_1 + W_2 = 5,88 \cdot 154 \cdot 10^{-6} = 0,0009 \text{ м}^3.$$

Подставляя численные значения $W_1 + W_2$ и q_0 в (2), получим $T_{on}^p = 6,81 \text{ с}$.

Таким образом, как и следовало ожидать, расчетное время опорожнения дюкера получается больше экспериментального.

Если же иметь в виду, что, согласно экспериментальным данным, объём воды в вертикальном участке ED правой ветки дюкера опорожняется за время $\approx 0,6$ с и за это же время колонна воды в левой ветке дюкера проходит расстояние $\approx 0,4$ м, то оставшийся в дюкере объём воды $W = (5,88 - 1,23 - 0,4) \cdot 154 \cdot 10^{-6} = 654,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ опорожняется за время

$$T_1 = \frac{2 \cdot 654,5 \cdot 10^{-6}}{264,4 \cdot 10^{-6}} = 4,95 \text{ с},$$

а полное время опорожнения дюкера будет $T_{on}^p = 0,6 + 4,95 = 5,55$ с, что хорошо согласуется с экспериментом.

Заключение. Экспериментальные исследования, проведенные при определенных характеристиках опытной установки, показали, что продолжительность опорожнения дюкеров, углы наклона веток которых в несколько (3...5) раз отличаются друг от друга, значительно меньше, чем в дюкерах, уклон веток которых существенно не отличается друг от друга.

При определении времени опорожнения вышеуказанных дюкеров в расчетах необходимо учесть возможность первоначального существенного опорожнения одной из веток дюкера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сури́н А.А.** Гидравлический удар в водопроводах и борьба с ним.- М.: Трансжелдориздат, 1946. - 371с.
2. **Дикаревский В.С., Краснянский И.И.** Напорные водоводы железнодорожного водоснабжения.- М.: Транспорт, 1978.- 279 с.
3. **Ащиянц Э.П.** Исследование нестационарного течения жидкости в дюкере при его опорожнении // Известия Союза строителей Армении: Сборник научных трудов. - Т.1. - 2015. - С.23-29.
4. **Մարտիկանյան Ա.Ա., Միքայելյան Վ.Բ.** Հնչումային ջրատարի շահագործման առանձնահատկությունները // Ճարտարապետության և շինարարության Հայաստանի ազգային համալսարանի տեղեկագիր: - Եր., 2015. - N 3. - էջ 75-84:
5. Сборник задач по машиностроительной гидравлике / **Д.А. Бутаев, З.А. Калмыкова, Л.Г. Подвиз** и др.- М.: Машиностроение, 1981.- 464 с.

Институт водных проблем и гидротехники им. акад. И.В. Егиазарова. Материал поступил в редакцию 17.03.2019.

Է.Պ. ԱՇՉԻՅԱՆՑ

ԴՅՈՒԿԵՐԻ ԴՍԱՐԿՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ՓՈՐՁԱՐԱՐԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ակ. Ի.Վ. Եղիազարովի անվան ջրային հիմնահարցերի և հիդրոտեխնիկայի ինստիտուտի լաբորատորիայում մոնտաժված է ճնշումային ջրատարի դյուկերային հատվածի լաբորատոր սարք: Դյուկերի ճյուղերից մեկը ուղղահայաց է հորիզոնի նկատմամբ, իսկ մյուսն ունի թեքության փոքր անկյուն: Այդ հատվածները ներկայացնում են փոքր տրամագծով թափանցիկ սիլիկոնից պատրաստված խողովակներ, ինչը թույլ է տվել վիզուալ կերպով դիտարկել ջրի դատարկման գործընթացը դյուկերից և որոշել նրա դատարկման տևողությունը: Ներկայացվում է ստացված փորձնական տվյալների համեմատությունը տեխնիկական գրականության մեջ առաջարկվող բանաձևով հաշվարկված արդյունքի հետ:

Առանցքային բառեր. դյուկեր, տարբեր թեքությամբ հատվածներ, գիտափորձ, դատարկման ժամանակամիջոց:

E.P. ASHCHYANTS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EMPTYING THE SIPHON

In the hydraulic laboratory of the Institute of Water Problems and Hydraulic Engineering after Academician J.V. Eghiazarov, an experimental plant of siphon is installed one twig of which is vertical and the other has a small gradient to the horizon. The twigs of the siphon are made of a transparent silicon pipe permitting to observe the physics of emptying of the siphon, and to define the duration of emptying.

The comparison of the experimental data with the results of calculation by the given formula is carried out.

Keywords: siphon, section of different gradients, experiment, emptying time.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՄԱՐԳՍՅԱՆ Ա.Ս.

ՄԱՀՔԻ ԷԼԵԿՏՐԱՌԱԶԳԱԿԱՆ ՏԱՏԱՆՈՒՄՆԵՐԸ ՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ՇԵՐՏՈՎ
ՊԻԵԶՈՒԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԲԱՂԱԴՐՅԱԼ ՏԱՐԱԾՈՒԹՅՈՒՆՈՒՄ 153

ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ Գ.Ա., ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Ա.Հ., ԵՂԻԱԶԱՐՅԱՆ Լ.Գ.,

ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ Ա.Գ.

ԲԱՐԴ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔՈՎ ՀԱՆՔԱՎԱՅՐԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ ԸՆՏՐՈՂԱԿԱՆ
ՀԱՆՈՒՅԹԻ ՆՈՐ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱ՝ ԶԱՆԳՎԱԾԱՅԻՆ ՊԱՅԹԵՑՄԱՄԲ..... 163

ՀԱԿՈԲՅԱՆ Ռ.Զ.

ԵՐԿՐԱԲԱՆԱՀԵՏԱԽՈՒԶԱԿԱՆ ՀՈՐԱՏԱՆՑՔԵՐԻ ՀՈՐԱՏՄԱՆ ՈՐԱԿԻ
ՉԱՓԱՆԻՇՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ..... 176

ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ Ս.Գ., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Ա.Ա.

ԱԾԽԱԾՆԱՅԻՆ ԽՏԱՆՅՈՒԹՈՒՄ ՊԱՐՈՒՆԱԿՎՈՂ ԱԶՆԻՎ ՄԵՏԱՂՆԵՐԻ
ԱՂԱՅԻՆ ՔԼՈՐԱՑՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ԿՈՐԶՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ 183

ՇԱԼԶՅԱՆ Դ.Ս., ԱՎՈՒՇՅԱՆ Ս.Ա., ՍՈՄԶՅԱՆ Ա.Ս., ՇՈՒԽՅԱՆ Ն.Ս., ԳՈՒՄՐՈՅԱՆ

Հ.Վ., ԿԱՊԼԱՆՅԱՆ Տ.Կ.

ԳԻՐՈՍԿՈՊԻ ԵՎ ԿՈՂՄՆԱՅՈՒՅՑԻ ՉԱՓՈՒՄՆԵՐԻ ՄԻԱԶՈՒԼՄԱՆ
ԻՐԱԿԱՆԱՅՈՒՄԸ ԿԱԼՄԱՆԻ ԶՏԻՉԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ 191

ՀԱԿՈԲՅԱՆ Ն.Պ.

ՊԱՏԿԵՐՆԵՐԸ ՄԻՄՎՈԼԻԿ ՆԵՐԿԱՅԱՑՄԱՆ ՓՈԽԱՐԿԵԼՈՒ ՀԱՄԱԿԱՐԳ
ՊԱՇՏՊԱՆՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՄՐՅԱԿՑԱՅԻՆ ԿՈՄԲԻՆԱՏՈՐ ԽԴԻՐՆԵՐԻ
ՀԱՄԱՐ 199

ՄԵԼԻՔՅԱՆ Վ.Շ., ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Ս.Ա., ՄԱՖԱՐՅԱՆ Կ.Հ., ԲԱԶԻԿՅԱՆ Մ.Վ.

ԳԵՐՑԱԾՐ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՄԲ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐՈՒՄ D ՏՐԻԳԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ..... 210

ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Վ.Գ., ՀՈՎԱԿԻՍՅԱՆ Տ.Հ., ՄԱՅԻԼՅԱՆ Դ.Գ., ՍՈՂՈՅԱՆ Հ.Է.,

ՄԱՐՏՈՅԱՆ Գ.Հ., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Ա.Պ.

ԱԿՈՒՍՏԻԿ ԷՄԻՄԻՈՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ԳՐԱՆՑՄԱՆ ԵՎ ՄՇԱԿՄԱՆ
ՀԱՄԱԿԱՐԳ 217

ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Ա.Ռ.

ԹՎԱՅԻՆ ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՏՐԱՄԱԲԱՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՌՈՒՄԸ
ՏԱՐԵՐԻ ՏԵՂԱԲԱՇԽՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ 225

ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ Դ.Լ.

ՀԵՏՄԻԼԻԿՈՆԱՅԻՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ
ԳՈՐԾԻՔՆԵՐՈՒՄ ՀԻՇՈՂՈՒԹՅԱՆ ԹԵՍՏԱՎՈՐՄԱՆ ԵՎ ԱՐԱՏՈՐՈՇՄԱՆ
ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻՆԻ ԻՐԱԿԱՆԱՑՄԱՆ ՍՏՈՒԳՈՒՄԸ..... 235

ՄԱՐԳՍՅԱՆ Դ.Գ.

ՆԵՐԴՐՎԱԾ ՀԻՇՈՂ ՍԱՐՔԵՐԻ ՖՈՒՆԿՑԻՈՆԱԼ ԹԵՍՏԱՎՈՐՄԱՆ ՍՑԵՆԱՐՆԵՐ
ԱՎՏՈՄՈԲԻԼԱՅԻՆ ԲՅՈՒՐԵՂՈՒՄ 246

ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Ա.Ա., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Գ.Ա.

ՌԱԴԻԱՑԻՈՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՀԱՇՎԻ ԱՌՆՈՂ ԹՎԱՅԻՆ
ՏԱՐՐԻ ՀԱՊԱՂՈՒՄՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՄՈԴԵԼ..... 253

ՍԻՄՈՆՅԱՆ Ս.Հ.

Ա.Ն. ԿՌԻԼՈՎԻ ՄԵԹՈԴԻ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ՆՄԱՆԱԿԸ ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ
ՄԱՏՐԻՑՆԵՐԻ ՍԵՓԱԿԱՆ ԱՐԺԵՔՆԵՐ – ՖՈՒՆԿՑԻՄԱՆԵՐԻ ԼՐԻՎ ՀԻՄՆԱԽՆԴԻ
ԼՈՒԾՄԱՆ ՀԱՄԱՐ..... 264

ԱՇՉԻՑԱՆՑ Է.Պ.

ԴՅՈՒԿԵՐԻ ԴԱՏԱՐԿՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ՓՈՐՁԱՐԱՐԱԿԱՆ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ..... 279

СОДЕРЖАНИЕ

САРГСЯН А.С. ЭЛЕКТРОУПРУГИЕ СДВИГОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ В СОСТАВНОМ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ СЛОЕМ.....	153
АГАРОНЯН Г.А., ОГАНЕСЯН А.Г., ЕГИАЗАРЯН Л.Г., АГАРОНЯН А.Г. НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СЕЛЕКТИВНОЙ РАЗРАБОТКИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МАССОВЫМ ВЗРЫВОМ	163
АКОПЯН Р.З. СПОСОБ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА БУРЕНИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН.....	176
АЙРАПЕТЯН С.Г., ПЕТРОСЯН А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ СОДЕРЖАЩИХСЯ В УГЛЕРОДИСТОМ КОНЦЕНТРАТЕ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ СОЛЕВОГО ХЛОРИРОВАНИЯ	183
ШАЛДЖЯН Д.С., АВУШЯН С.А., МОМДЖЯН А.М., ШУХЯН Н.С., ГУМРОЯН Р.В., КАПЛАНЯН Т.К. СЛИЯНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ГИРОСКОПА И КОМПАСА НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА	191
АКОПЯН Н.П. СИСТЕМА ПЕРЕВОДА ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИМВОЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДЛЯ КОМБИНАТОРНЫХ ЗАДАЧ ЗАЩИТЫ И КОНКУРЕНЦИИ.....	199
МЕЛИКЯН В.Ш., АРУТЮНЯН С.А., САФАРЯН К.Г., БАЗИКЯН М.В. РАЗРАБОТКА Д ТРИГГЕРА ДЛЯ СИСТЕМ СО СВЕРХНИЗКИМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ.....	210
ПЕТРОСЯН В.Г., ОВАКИМЯН Т.О., МАИЛЯН Д.Г., СОГОЯН А.Э., МАРТОЯН Г.Г., ПЕТРОСЯН А.П. СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ.....	217
МАРТИРОСЯН А.Р. УЧЕТ ЛОГИКИ РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ СХЕМ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ	225
АЙРАПЕТЯН Д.Л. ВЕРИФИКАЦИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕСТИРОВАНИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПАМЯТИ В ПРОГРАММНЫХ ИНСТРУМЕНТАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОСТСИЛИКОНОВОГО АНАЛИЗА	235
САРКИСЯН Д.Г. СЦЕНАРИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ ПАМЯТИ, ВСТРОЕННЫХ В СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ СИСТЕМ.....	246

ПЕТРОСЯН А.А., ПЕТРОСЯН Г.А.

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЗАДЕРЖКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА ЦИФРОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	253
--	-----

СИМОНЯН С.О.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ АНАЛОГ МЕТОДА А.Н. КРЫЛОВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПОЛНОЙ ПРОБЛЕМЫ СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ - ФУНКЦИЙ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЦ.....	264
--	-----

АЩИЯНЦ Э.П.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПОРОЖНЕНИЯ ДЮКЕРА	279
---	-----

CONTENTS

SARGSYAN A.S. ELECTROELASTIC SHIFT VIBRATIONS IN COMPOSITE PIEZOELECTRIC SPACE WITH A METALLIC LAYER.....	153
AHARONYAN G.A., HOVHANNISYAN A.H., YEGHIAZARYAN L.G., AHARONYAN A.G. A NEW TECHNOLOGY FOR SELECTIVE DEVELOPMENT OF COMPLEX- STRUCTURE DEPOSITS BY MASS EXPLOSION.....	163
HAKOBYAN R.Z. THE QUALITY CRITERION OF DRILLING GEOLOGICAL- EXPLORATION WELLS.....	176
HAYRAPETYAN S.G., PETROSYAN A.A. INVESTIGATING THE PROCESS OF EXTRACTING PRECIOUS METALS CONTAINED IN THE CARBON CONCENTRATE BY THE METHOD OF SALT CHLORINATION.....	183
SHALJYAN D.S., AVUSHYAN S.A., MOMJYAN A.M., SHUKHYAN N.S., GUMROYAN H.V., KAPLANYAN T.K. IMPLEMENTING THE SENSOR FUSION OF THE GYROSCOPE AND A COMPASS BASED ON THE KALMAN FILTER.....	191
HAKOBYAN N.P. A SYSTEM FOR TRANSFORMING IMAGES TO SYMBOLIC PRESENTATION FOR COMBINATORIAL DEFENSE AND COMPETITION PROBLEMS	199
MELIKYAN V.SH., HARUTYUNYAN S.A., SAFARYAN K.H., BAZIKYAN M.V. IMPLEMENTATION OF D FLIP-FLOP FOR ULTRA-LOW POWER SYSTEMS	210
PETROSYAN V.G., HOVAKIMYAN T.H., MAYILYAN D.G., SOGHOYAN A.E., MARTOYAN G.H., PETROSYAN A.P. AN ACOUSTIC EMISSION SIGNAL REGISTRATION AND ACQUISITION SYSTEM	217
MARTIROSYAN A.R. CONSIDERING THE DIGITAL CIRCUIT LOGIC DURING CELL PLACEMENT	225
HAYRAPETYAN D.L. VERIFICATION OF THE MEMORY TEST AND DIAGNOSIS FLOW IMPLEMENTATION IN SOFTWARE POST-SILICON ANALYSIS AUTOMATION TOOLS	235
SARGSYAN D.G. FUNCTIONAL TESTING SCENARIOS FOR EMBEDDED MEMORIES IN AUTOMOTIVE SOC.....	246

PETROSYAN A.A., PETROSYAN G.A.	
A MODEL FOR CALCULATING THE PROPAGATION DELAY OF DIGITAL ELEMENTS CONSIDERING THE RADIATION IMPACT	253
SIMONYAN S.H.	
THE DIFFERENTIAL ANALOGUE OF THE A.N. KRYLOV METHOD FOR SOLVING THE COMPLETE PROBLEM OF ITS OWN VALUES - FUNCTIONS OF ONE-PARAMETRIC MATRICES.....	264
ASHCHYANTS E.P.	
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EMPTYING THE SIPHON.....	279