

**Բ Ա Ն Բ Ե Ր**

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ  
ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ**

**ՏԵՂԵԿԱՏՎԱԿԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՆԵՐ,  
ԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱ, ՌԱԴԻՈՏԵԽՆԻԿԱ**

№ 2

Երևան 2015

---

**В Е С Т Н И К**

**НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА АРМЕНИИ**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,  
ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА**

№ 2

Ереван 2015

---

**P R O C E E D I N G S**

**OF NATIONAL POLYTECHNIC UNIVERSITY  
OF ARMENIA**

**INFORMATION TECHNOLOGIES,  
ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING**

№ 2

Yerevan 2015

---

**Հանդեսը հրատարակվում է 1998 թվականից**

**Բանբերի խմբագրական խորհուրդ.** Յու. Լ. Սարգսյան (գլխավոր խմբագիր), Հ.Ա. Թերզյան (գլխավոր խմբագրի տեղակալ), Ա.Խ. Գրիգորյան (գլխավոր խմբագրի տեղակալ), Ա.Գ. Ավետիսյան (պատասխանատու քարտուղար), Ս.Գ. Աղբալյան, Մ.Ք. Բաղդասարյան, Հ.Վ. Թոքմաջյան, Ն.Բ. Կնյազյան, Ս.Հ. Սիմոնյան, Ս.Շ. Խրիստաֆորյան

**Հանդեսի խմբագրական խորհուրդ.** Ս.Հ. Սիմոնյան (հանդեսի գլխավոր խմբագիր), Վ.Շ. Մելիքյան (հանդեսի գլխավոր խմբագրի տեղակալ), Մ.Գ. Խաչատրյան (հանդեսի պատասխանատու քարտուղար), Ա.Հ. Առաքելյան, **Վ.Ե. Արուստամյան**, Վ.Ի. Հահանով (Ուկրաինա), Վ.Մ. Հարությունյան, Վ.Վ. Բունիաթյան, Ռ.Ռ. Վարդանյան, Օ.Ն. Գասպարյան, Ս.Վ. Գավրիլով (ՌԴ), Ա.Գ. Ղուկասյան, Վ.Ս. Ջաքարյան, Թ.Ա. Նալչաջյան, Ս.Խ. Խուրադվերդյան, Օ.Վ. Ստուկաչ (ՌԴ)

Խմբագիրներ՝ Ժ.Ս. Սեյրանյան, Հ.Յ. Պետրոսյան, Հ.Ջ. Ղազարյան

© Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան (ՀԱՊՀ), «Ճարտարագետ»  
հրատարակչություն, հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան 105, ՀԱՊՀ, banber.seua.am

---

**Журнал издается с 1998г.**

**Редакционная коллегия Вестника:** Ю.Л. Саркисян (главный редактор), А.А. Терзян (зам. главного редактора), А.Х. Григорян (зам. главного редактора), А.Г. Аветисян (ответственный секретарь), С.Г. Агбалиян, М.К. Багдасарян, Н.Б. Князян, С.О. Симонян, О.В. Токмаджян, С.Ш. Христафорян

**Редакционная коллегия журнала:** С.О. Симонян (главный редактор журнала), В.Ш. Меликян (зам. главного редактора журнала), М.Г. Хачатрян (ответственный секретарь журнала), А.А. Аракелян, **В.Е. Арустамян**, В.М. Арутюнян, В.В. Бунятыан, Р.Р. Варданян, С.В. Гаврилов (РФ), О.Н. Гаспарян, А.Г. Гулян, В.С. Захарян, Т.А. Налчаджян, О.В. Стукач (РФ), В.И. Хаханов (Украина), С.Х. Худавердян

Редакторы: Ж.С. Сейранян, А.Ц. Петросян, А.З. Казарян

© Издательство Национального политехнического университета Армении (НПУА)  
“Чартарaget”, адрес редакции: 0009, Ереван, ул. Теряна 105, НПУА, vestnik.seua.am

---

**The journal has been published since 1998**

**Editorial Council of Proceedings:** Yu.L. Sargsyan (editor-in-chief), H.A. Terzyan (vice-editor-in-chief), A.Kh. Grigoryan (vice-editor-in-chief), A.G. Avetisyan (responsible secretary), S.G. Aghbalyan, M.K. Baghdasaryan, S.Sh. Khristaphoryan, N.B. Knyazyan, S.H. Simonyan, H.V. Tokmajyan

**Editorial Council of the journal:** S.H. Simonyan (Editor-in-chief of the Journal), V.Sh. Melikyan (vice-editor of the Journal), M.G. Khachatryan (responsible secretary of the Journal), A.H. Arakelyan, **V.Ye. Arustamyan**, V.M. Harutyunyan, V.V. Buniatyan, O.N. Gasparyan, S.V. Gavrilo (RF), A.G. Ghulyan V.I. Hahanov (Ukrain), S.Kh. Khudaverdyan, T.A. Nalchajyan, R.R. Vardanyan, O.V. Stoukach (RF), V.S. Zakaryan

Editors: Zh. S. Seyranyan, H.Ts. Petrosyan, H.Z. Ghazaryan

© National Polytechnic University of Armenia (NPUA) “Tchartaraget” Publishing House  
Address: 0009, Yerevan, 105 Teryan str., NPUA, proceedings.seua.am

## ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

Խմբագրի կողմից

6

### ԻՆՖՈՐՄԱՑԻՈՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՆԵՐ

Բալասանյան Ա.Շ.

Բարդ բազմավիճակ տեխնոլոգիական համակարգերի ստրատիֆիկացված ձևայնացման պրոբլեմակողմնորոշված մեթոդ 9

Գասպարյան Օ.Ն., Օհանյան Օ.Հ.

Դիսկրետ միատիպ կարգավորման համակարգերի հետազոտումը երկգծային ձևափոխության հիման վրա 21

Սիմոնյան Ա.Հ.

Ստեյնի տիպի  $A(t) \cdot X(t) \cdot B(t) - X(t) = C(t)$  միապարամետրական մատրիցային հավասարումների լուծման վերաբերյալ 32

### ԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱ

Մամիկոնյան Բ.Մ., Նիկողոսյան Դ.Ա., Աբրահամյան Լ.Ա.

Դիֆերենցիալ ունակային կերպափոխիչի ինֆորմատիվ պարամետրի լայնահիմալուսային կերպափոխումը 43

Պետրոսյան Օ.Հ., Խաչիկյան Լ.Է.

Կենսաբանական օբյեկտների վերլուծությունը և մոդելավորումը 49

Բունիաթյան Վ.Վ., Ցականով Վ.Մ., Կարոյան Գ.Ա., Դաշտոյան Հ.Ռ.

Նուրբ թաղանթային Pt/Ba<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>TiO<sub>3</sub>/Pt կառուցվածքների I-V բնութագրերը՝ էլեկտրոնային փնջով ճառագայթելիս 60

### ՌԱԴԻՈՏԵԽՆԻԿԱ

Եզակյան Ն.Դ., Սիմոնյան Ռ.Հ., Ղուլյան Ա.Գ.

Շնչառական պարամետրերի նմանակիչ 71

Ղուլյան Ա.Գ., Փիրումյան Հ.Ա., Ավետիսյան Գ.Ա.

Սեյսմիկական նախանշանների գնահատման ռադիոաստղագիտական համակարգ 76

Մուժիկյան Ն.Ա., Սարգսյան Ա.Ա.

Երկհայելի սֆերիկ անտենայի կիզակետային տիրույթում էլեկտրամագնիսական դաշտի հետազոտումը 83

Ծատուրյան Ա.Հ.

Ֆոտոհոսանքի վերլուծությունը անվտանգության և ապահովության համակարգերում 90

### ՏԵՂԵԿԱՏՎԱԿԱՆ ՆՅՈՒԹԵՐ

98

Հեղինակների ցուցակ

99

Հոդվածների ձևավորման կանոններ

105

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>От редактора</i>	7
<b><u>ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ</u></b>	
<b>Баласанян С.Ш.</b> Проблемно ориентированный метод стратифицированной формализации сложных технологических систем со многими состояниями	9
<b>Гаспарян О.Н., Оганян О.Г.</b> Исследование дискретных одноплатных систем регулирования на основе билинейного преобразования	21
<b>Симонян С.О.</b> К решению однопараметрических матричных уравнений типа Стейна $A(t) \cdot X(t) \cdot B(t) - X(t) = C(t)$	32
<b><u>ЭЛЕКТРОНИКА</u></b>	
<b>Мамиконян Б.М., Никогосян Д.С., Абрамян Л.С.</b> Широтно-импульсное преобразование информативного параметра дифференциального емкостного преобразователя	43
<b>Петросян О.А., Хачикян Л.Э.</b> Анализ и моделирование биологических объектов	49
<b>Буниатян В.В., Цаканов В.М., Кароян Г.С., Даштоян О.Р.</b> I-V характеристики тонкопленочных Pt/Ba <sub>x</sub> Sr <sub>1-x</sub> TiO <sub>3</sub> /Pt структур под воздействием электронного луча	60
<b><u>РАДИОТЕХНИКА</u></b>	
<b>Езакян Н.Д., Симонян Р.Г., Гулян А.Г.</b> Имитатор дыхательных параметров	71
<b>Гулян А.Г., Пирумян Г.А., Аветисян Г.С.</b> Радиоастрономическая система для оценки симптомов сейсмической опасности	76
<b>Мужикян Н.С., Саргсян А.С.</b> Исследование электромагнитного поля в фокальной области двухзеркальной сферической антенны	83
<b>Цатурян С.У.</b> Анализ фототока в системах безопасности и охраны	90
<b><u>Информационные материалы</u></b>	98
<i>Список авторов</i>	101
<i>Правила оформления статей</i>	106

## C O N T E N T

*Editorial* 8

### INFORMATION TECHNOLOGIES

**Balasanian S.Sh.**

A Problem-oriented Method for Stratified Formalization of Multistate Complex Technological Systems 9

**Gasparian O.N., Ohanyan O.H.**

Investigating the Discrete Uniform Control Systems Based on the Bilinear Transform 21

**Simonyan S.H.**

The Solution of One-parametric Stein-type Matrix Equations  
 $A(t) \cdot X(t) \cdot B(t) - X(t) = C(t)$  32

### ELECTRONICS

**Mamikonyan B.M., Nikoghosyan D.S., Abrahamyan L.S.**

The Pulse-width Conversion of the Informative Parameter of Differential Capacitive Transducer 43

**Petrosyan O.H., Khachikyan L.E.**

Analysis and Simulation of Biological Objects 49

**Buniatyan V.V., Tsakanov V.M., Karoyan G.S., Dashtoyan H.R.**

I-V Characteristics of Thin Film Pt/Ba<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>TiO<sub>3</sub>/Pt Structures under the Impact of Electron Beam Irradiation 60

### RADIO ENGINEERING

**Yezakyan N.D., Simonyan R.H., Ghulyan A.G.**

A Simulator of Respiratory Parameters 71

**Ghulyan A.G., Pirumyan H.A., Avetisyan G.S.**

A Radio Astronomy System for Estimating Seismic Hazards 76

**Muzhikyan N.S., Sargsyan A.S.**

Investigating the Electromagnetic Field in the Focal Region of Double-reflector Spherical Antenna 83

**Tsaturyan S.H.**

Photocurrent Analysis in Security and Safety Systems 90

Information materials 98

*List of the Authors* 103

*Rules for preparing the articles* 107

## Խ Մ Բ Ա Գ Ր Ի Կ Ո Ղ Մ Ի Ց

Հարգելի ընթերցողներ՝

Ձեզ է ներկայացվում ՀԱՊՀ «Բանբերի» «Տեղեկատվական տեխնոլոգիաներ, էլեկտրոնիկա, ռադիոտեխնիկա» հանդեսի 2015թ. հերթական համարը:

«Տեղեկատվական տեխնոլոգիաներ» բաժնում առաջարկվել են բարդ բազմավիճակ տեխնոլոգիական համակարգերի ստրատիֆիկացված ձևայնացման պրոբլեմա-կողմնորոշված մեթոդ և դրանց արդյունավետության գնահատման ու հետազոտման ընդհանրական ստրատիֆիկացված մոդել: Դիտարկվել են դիսկրետ միատիպ կարգավորման համակարգերի հետազոտման հարցերը՝ երկգծային ձևափոխության հիման վրա: Առաջարկվել են Ստեյնի տիպի միապարամետրական մատրիցային հավասարումների լուծման անալիտիկ, ինչպես նաև հաջորդական և զուգահեռ թվաանալիտիկ եղանակներ, որոնք հիմնված են դիֆերենցիալ ձևափոխությունների վրա:

«Էլեկտրոնիկա» բաժնում նկարագրվել է դիֆերենցիալ ունակային կերպափոխիչով չափման սարք, ընդ որում՝ չափման գործընթացի կառավարումը և չափումների արդյունքների մշակումն իրականացվել են ծրագրավորվող միկրոկոնտրոլերով: Օրգանիզմի հյուսվածքի խոր շերտերի ունակության և դիմադրության հաշվառմամբ առաջարկվել է հյուսվածքի մոդելի կառուցման մեթոդիկա, որն ապահովում է մոդելի հավաստիությունը: Տեսականորեն հետազոտվել են ֆերոէլեկտրական բարակ թաղանթներում (Pt/BSTO/Pt) կորստյան հոսանքները, երբ թաղանթը ենթարկվում է էլեկտրոնային փնջի ճառագայթման:

«Ռադիոտեխնիկա» բաժնում նկարագրվել է սարք, որը նմանակում է մարդու շնչառական գործընթացի բոլոր հիմնական ֆունկցիաները, այդ թվում՝ շրջակա օդի ներշնչումը և տաքացրած ու խոնավացրած գազային խառնուրդների արտաշնչումը: Դիտարկվել են իոնոլորտի ուղղահայաց զոնդավորման  $\lambda = 4,2$  մ ալիքի երկարության տիրույթի համակարգի կառուցվածքը և տեխնիկական բնութագրերը, ինչպես նաև սեյսմիկական նախանշանների գնահատման նպատակով դիտումների տվյալների թվանշային եղանակով մշակմամբ ինտերֆերենցիոն ռադիոդիտակի զգայնության մեծացման հնարավորությունները: Կատարվել են հաշվարկներ, որոնք թույլ են տալիս գտնել երկհայելի սֆերիկ անտենայի բաղադրիչ մասերի դիրքերի փոփոխության ազդեցությունը անտենայի ուղղվածության դիագրամի ճառագայթի վրա: Ուսումնասիրվել է ընտրողական զգայնությամբ տվիչ (ֆոտոդիոդ), որն ունակ է զգալու և հայտնաբերելու տարբեր խառնուրդային նյութեր բնական օբյեկտներում:

Հանդեսի գլխավոր խմբագիր՝

Ս.Հ. Սիմոնյան

## О Т Р Е Д А К Т О Р А

Уважаемые читатели!

Представляем Вашему вниманию очередной номер Вестника НПУА-“Информационные технологии, электроника, радиотехника” за 2015 год.

В разделе “Информационные технологии” предложены проблемно ориентированный метод стратифицированной формализации и обобщенная стратифицированная модель для оценки и анализа эффективности функционирования сложных технологических систем. Рассмотрены вопросы исследования на основе билинейного преобразования дискретных однопараметрических систем регулирования. Предложены решения однопараметрических неявных дискретных матричных уравнений типа Стейна: аналитический метод, а также последовательный и параллельный численно-аналитические методы, основанные на дифференциальных преобразованиях.

В разделе “Электроника” описано измерительное устройство с дифференциальным емкостным преобразователем, а управление процессом измерений и обработка их результатов осуществлены программируемым микроконтроллером. Предложена методика построения модели биоткани с учетом влияния емкости и сопротивления глубоких слоев ткани, которая обеспечивает достоверность модели. Теоретически исследованы токи утечки в сегнетоэлектрических тонких пленках (Pt/BSTO/Pt) в случае, когда пленка подвергается воздействию электронного луча.

В разделе “Радиотехника” описано устройство, имитирующее все основные функции дыхательного процесса человека, в том числе вдыхание воздуха из окружающей среды и выдыхание нагретых и увлажненных газовых смесей. Рассмотрены структура и технические характеристики системы вертикального зондирования ионосферы на длине волны  $\lambda = 4,2$  м, а также представлены возможности улучшения чувствительности интерференционного радиотелескопа методом цифровой обработки данных наблюдений с целью исследования оценки симптомов сейсмической опасности. Проведены расчеты, позволяющие определить влияние изменения положений составных частей антенны на диаграмму направленности. Исследован датчик (фотодиод) с селективной чувствительностью, который может обнаружить различные вещества в биообъектах.

Главный редактор журнала  
С.О. Симонян

## EDITORIAL

Dear readers,

The next issue of the NPUA Proceedings – “Information Technologies, Electronics, Radio Engineering” is introduced to you.

In the section “Information technologies”, a problem-oriented method for stratified formalization, and a generalized stratified model for assessing and analyzing the functioning efficiency of complex technological systems are proposed. Issues on investigating discrete uniform control systems on the basis of bilinear transformation are considered. Methods for solving one-parametric implicit discrete matrix Stein-type equations are proposed: the analytical method, as well as successive and parallel numerical-analytical methods based on differential transformations.

In the section “Electronics”, a measuring device with differential capacitive transducer is described, and the measurement process control, and the processing of the measurement results are carried out by a programmable microcontroller. A method for constructing a model of biological tissue taking into account the influence of capacitance and resistance of the deep layers of the tissue, providing the accuracy of the model is proposed. A detailed theoretical study of the leakage currents in ferroelectric thin films (Pt/BSTO/Pt) is presented, when the film is irradiated by an electron beam.

In the section “Radio engineering”, a device, simulating all the basic functions of the respiratory process of a human, including inhalation of ambient air and exhalation of heated and humidified gas mixtures is described. The structure and system specifications of vertical sounding of ionosphere at a wavelength of  $\lambda = 4,2 \text{ m}$  are considered, as well as the opportunities, improving the sensitivity of the interference radio telescope by the method of digital processing of the data observations to study the seismic hazard assessment symptoms are introduced. Calculations, allowing to determine the impact of the position changes of the antenna's components on the antenna pattern are carried out. A selectively sensitive sensor (photodiode) for detecting mixed substances in bioobjects is investigated.

Editor -in-chief of the Journal  
S.H. Simonyan

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.51

### **ПРОБЛЕМНО ОРИЕНТИРОВАННЫЙ МЕТОД СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ФОРМАЛИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ СО МНОГИМИ СОСТОЯНИЯМИ**

**С.Ш. Баласанян**

*Национальный политехнический университет Армении, Капанский филиал*

Предложены проблемно ориентированный метод стратифицированной формализации и обобщенная стратифицированная модель для оценки и анализа эффективности функционирования сложных технологических систем со многими работоспособными состояниями. С применением предложенного метода формализации разработана компьютерная стратифицированная модель технологической системы измельчения руды (ТСИР), описывающая процесс ее функционирования под воздействием случайного процесса возникновения отказов и восстановления отказавшего оборудования на уровнях измельчительных агрегатов, измельчительных комплексов и на системном уровне. Применение предложенного метода формализации позволило свести описание ТСИР к описанию ее частей и их сопряжения, предоставляя возможность аналитического описания системы на первом и третьем уровнях.

**Ключевые слова:** проблемно ориентированный метод, стратифицированная формализация, надежность, руда, измельчение, моделирование, функционирование.

**Введение.** Традиционная теория и бинарные модели надежности предполагают, что система и ее элементы могут иметь лишь два возможных состояния - состояние полной работоспособности и состояние полного отказа. Однако в большинстве случаев для современных сложных технических, в частности автоматизированных технологических систем (САТС), практически невозможно определить общепринятое понятие отказа [1, 2], поскольку отказы отдельных элементов могут привести не к полному выходу системы из строя, а лишь к ухудшению качества ее функционирования. Это обусловлено наличием в сложных системах функциональной и структурной избыточности, благодаря чему система обладает свойством реконфигурации (перестроения) структуры и способностью функционировать при отказах элементов с различными уровнями

эффективности. В современной теории надежности такие системы известны как сложные технические системы, или системы со многими состояниями (СМС) (multistate systems) [1, 2]. Для СМС вместо общепринятого понятия надежности рассматривается эффективность функционирования, оценка и исследование которой производится с помощью показателя, учитывающего влияние надежности элементов системы на качество ее функционирования.

При инженерном анализе надежности СМС важное значение имеет адекватность математических моделей. Как справедливо отмечает И.А. Ушаков [3], адекватность математической модели надежности реальному техническому объекту гораздо важнее ее математической “строгости”. С этой точки зрения имитационные (компьютерные) модели, реалистически отражающие действительность, несомненно, обладают бо́льшей степенью адекватности, чем аналитические модели [1, 2, 4]. Однако построение имитационных моделей для исследования эффективности функционирования САТС с учетом надежности является довольно сложной и трудоемкой задачей. Именно большая трудоемкость, время разработки и реализации модели считаются основным недостатком метода имитационного моделирования (ИМ).

**Постановка задачи.** Наиболее актуальной и чрезвычайно трудной из проблем, встречающихся при построении имитационной модели функционирования исследуемой системы, реализующей отображение  $Y^0(t) \rightarrow Y^k(t)$ , является преодоление ее сложности, обусловленной большой размерностью пространства состояний системы.

Применение известных методов и способов для упрощения имитационных моделей функционирования сложных систем либо недопустимо снижает точность моделей и резко ограничивает их возможности, либо не дает ощутимого эффекта. В связи с этим возникает необходимость применения качественно новых и более эффективных подходов, позволяющих при исследовании эффективности функционирования современных сложных систем методом ИМ успешно преодолевать их большую размерность, а также сократить сроки и уменьшить трудоемкость построения имитационных моделей.

Одним из возможных путей комплексного решения указанных выше проблем является применение концепции иерархического многоуровневого (стратифицированного) описания систем [5]. Ее сущность состоит в том, что исследуемая сложная система с произвольной структурой описывается не одной моделью типа “вход-выход” большой размерности, а иерархией относительно несложных моделей, каждая из которых описывает поведение одной и той же системы с точки зрения определенного уровня абстрагирования (детализации). Однако современный уровень развития теории иерархических многоуровневых

систем пока не предоставляет возможность ее широкого практического применения при исследовании эффективности функционирования САТС с учетом надежности их элементов из-за чрезмерно высокого уровня общности и формализации изложенных принципов и теоретических положений. В связи с этим возникает практическая необходимость в разработке конкретного метода стратифицированной формализации и обобщенной модели, ориентированных на оценку и анализ эффективности функционирования САТС с учетом надежности их элементов.

**Проблемно ориентированный метод стратифицированной формализации.** В настоящей работе предлагаются проблемно ориентированный метод стратифицированной формализации и обобщенная стратифицированная модель, позволяющие преодолеть трудности формализации САТС определенного класса, для которых приемлемы следующие предположения:

1. На каждом  $\mu$ -ом уровне описания (страте) рассматриваемая система, представленная в виде совокупности взаимосвязанных подсистем  $(\mu - 1)$ -го уровня или элементов (на первой страте), может быть разбита на конечное число подсистем  $\mu$ -го уровня.

2. Состояние каждой подсистемы любого уровня и само́й системы, рассматриваемой как одно целое, характеризуется упорядоченной совокупностью выходных характеристик, определяющих качество их функционирования. Состояние системы на каждом уровне описания рассматривается как упорядоченная совокупность состояний ее подсистем соответствующего уровня.

3. Воздействие внешних по отношению к рассматриваемой системе факторов непосредственно воспринимается элементами системы и может привести к изменению их работоспособности.

4. На любом  $\mu$ -ом уровне описания (кроме первой) состояние каждой подсистемы  $\mu$ -го уровня в данный момент времени непосредственно зависит от состояний определенных, в том числе входящих в ее состав подсистем  $(\mu - 1)$ -го уровня. Следовательно, на каждой  $\mu$ -й страте подсистемы  $\mu$ -го уровня взаимодействуют между собой только через входящие в их состав подсистемы  $(\mu - 1)$ -го уровня.

5. Состояние каждой подсистемы первого уровня в данный момент времени однозначно определяется работоспособностью входящих в ее состав элементов и элементов других подсистем, влияющих на ее работоспособность в этот момент времени.

Суть предлагаемого метода формализации заключается в следующем.

1. Исходя из характера решаемых на модели задач, удобства описания и сложности рассматриваемой системы, предварительно выбираются уровни описания (страты). При этом, с целью обеспечения простоты описания и гибкости модели, в обязательном порядке предусматриваются страты, на которых происходит реконфигурация структуры системы. Если условия поставленных задач позволяют, то желательно выбрать такие страты, на которых функционирование отдельных подсистем моделируемой системы поддается аналитическому описанию.

2. Составляется словесное качественное описание последствий изменения выходных характеристик элементов системы примерно в следующей форме: изменение характеристик элемента  $E_i^0$  вызывает изменение выходных характеристик элемента  $E_j^0$  (или состояние элемента  $E_j^0$  зависит от состояния элемента  $E_i^0$ ). На основании этого описания строится формализованная структурная схема системы в виде орграфа  $G^0(E^0, V^0)$ , отражающего взаимные влияния элементов  $E_i^0, i \in I^0 = \{1, 2, \dots, p_0\}$  в системе. Вершины графа  $G^0$  соответствуют элементам системы, а дуги - связям между ними.

Система, заданная графом  $G^0$ , разбивается на подсистемы первого уровня  $E_i^1, i \in I^1 = \{1, 2, \dots, p_1\}$ . При этом соблюдаются следующие условия:

$$E_i^1 = \{E_k^0 : k \in I_i^0 \subset I^0\}, \bigcup_{i \in I^1} E_i^1 = E^0, E_i^1 \cap E_j^1 = \emptyset, i \in I^1, j \in I^1, i \neq j.$$

Далее в качестве компонентов моделируемой системы рассматриваются подсистемы первого уровня, т.е. производится укрупнение элементов системы в соответствии с проведенной декомпозицией. Затем вышеизложенным способом составляется словесное качественное описание взаимного влияния подсистем  $E_i^1, i \in I^1$  в системе, на основании чего строится формализованная структурная схема системы в виде орграфа  $G^1(E^1, V^1)$  со множеством вершин  $E^1 = \{E_i^1 : i \in I^1\}$ . Далее система, заданная орграфом  $G^1$ , разбивается на более крупные подсистемы второго уровня  $E_i^2, i \in I^2 = \{1, 2, \dots, p_2\}$  с соблюдением следующих условий:

$$E_i^2 = \{E_k^1 : k \in I_i^1 \subset I^1\}, \bigcup_{i \in I^2} E_i^2 = E^1, E_i^2 \cap E_j^2 = \emptyset, i \in I^2, j \in I^2, i \neq j.$$

Процедура многократного разбиения системы на подсистемы различных уровней продолжается до последнего  $k$ -го уровня описания, на котором система рассматривается как одно целое – крупная подсистема.

На каждой  $\mu$ -й страте на основании разбиения орграфа  $G^{\mu-1}$  на подграфы строится двухуровневый орграф (двудольный граф или биграф)  $\hat{G}^\mu(\hat{E}^\mu, \hat{V}^\mu)$ , отражающий взаимное влияние подсистем  $\mu$ -го уровня, осуществляемое через входящие в их состав подсистемы  $(\mu-1)$ -го уровня. Каждый биграф  $\hat{G}^\mu$  строится следующим образом. Пусть система на  $\mu$ -й страте задана орграфом  $G^{\mu-1}$  со множеством вершин  $E^{\mu-1} = \{E_i^{\mu-1} : i \in I^{\mu-1}\}$  и множеством дуг  $V^{\mu-1}$ . Фиксируем некоторое разбиение  $E^\mu = \{E_i^\mu : i \in I^\mu\}$  множества вершин  $E^{\mu-1}$ . Данному фиксированному разбиению  $E^\mu$  сопоставляется двухуровневый орграф  $\hat{G}^\mu(\hat{E}^\mu, \hat{V}^\mu)$  со множеством вершин:

$$\hat{E}^\mu = E^{\mu-1} \cup E^\mu = \{E_i^{\mu-1} : i = \overline{1, p_{\mu-1}}\} \cup \{E_j^\mu : j = \overline{1, p_\mu}\}.$$

Причем вершины  $E_i^{\mu-1}, i \in I^{\mu-1}$  располагаются на первом уровне, а вершины  $E_j^\mu, j \in I^\mu$  - на втором. Вершины одного и того же уровня друг с другом не связаны. Дуги, соединяющие вершины первого и второго уровней, определяются следующим образом: из вершины  $E_i^{\mu-1}$  в вершину  $E_j^\mu$  идет дуга, когда  $E_i^{\mu-1} \in E_j^\mu$  или когда в графе  $G^{\mu-1}$  имеется дуга, направленная от вершины  $E_j^{\mu-1}$  в некоторую вершину из  $E_j^\mu$ . Однонаправленные параллельные дуги сливаются. Путем последовательной композиции построенных биграфов  $\hat{G}^\mu, \mu \in I$ , отождествляя вершины второго уровня каждого биграфа  $\hat{G}^{\mu-1}$  и соответствующие вершины первого уровня биграфа  $\hat{G}^\mu$ , снизу вверх строится иерархический  $k$ -уровневый орграф  $G(E, V)$ , где вершина  $E_1^k$  соответствует системе, рассмотренной как одно целое. Множества вершин и дуг орграфа  $G$  определяются следующими соотношениями:

$$E = \bigcup_{\mu=1}^k \hat{E}^\mu, \quad V = \bigcup_{\mu=1}^k \hat{V}^\mu.$$

Таким образом, на данном этапе формализации в результате проведенной процедуры исследуемая система с произвольной структурой представлена в виде строго иерархической многоуровневой конструкции - орграфа  $G(E, V)$ .

3. На каждой  $\mu$ -й страте на основании содержательного описания выделенных подсистем  $\mu$ -го уровня проводится формализация их функцио-

нирования, в результате чего для каждой подсистемы  $E_i^\mu$  строится ее математическая модель  $S_i^\mu$ . При этом, согласно принятым предположениям, в качестве выходного сигнала каждой подсистемы  $\mu$ -го уровня рассматривается совокупность ее выходных характеристик, а в качестве входного сигнала - совокупность соответствующих выходных характеристик тех подсистем  $(\mu-1)$ -го уровня, которые в графе  $G(E,V)$  или в биграфе  $\hat{G}^\mu$  соединены с данной подсистемой дугами.

Придерживаясь терминологии, примененной в [5], полученная в результате проведенной формализации обобщенная модель названа строго иерархической стратифицированной системой (СИСС), а уровни детализации, включающие стратифицированное описание, – стратами. Каждая страта  $S^\mu$  СИСС представляет собой упорядоченную совокупность несвязанных между собой конечного числа элементов  $S_i^\mu, i \in I^\mu, \mu \in I$ , являющихся временными статическими системами без памяти (ВССБП) [6]. Структуру связей между элементами СИСС можно представить в виде ориентированного графа (рис. 1). Разработана математическая модель СИСС [7], включающая формальное описание ее элементов  $S_i^\mu, i \in I^\mu, \mu \in I$  и модель их сопряжения [8].

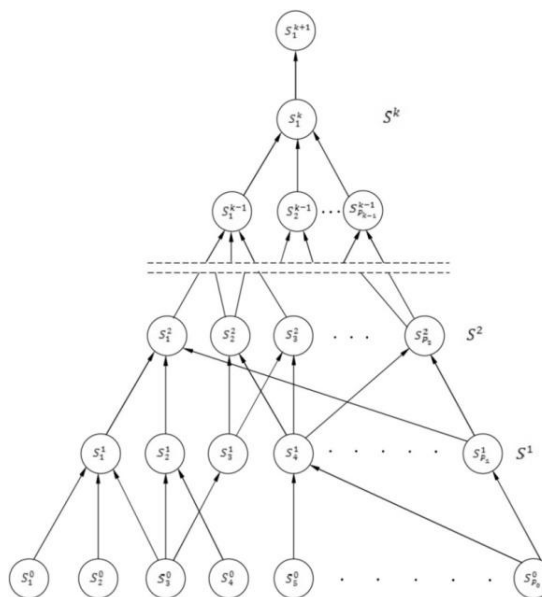


Рис. 1. Структура СИСС

**Практическое применение предлагаемого метода формализации.** С применением предложенного метода формализации разработана стратифицированная компьютерная модель функционирования ТСИР [7] Зангезурского медно-молибденового комбината, учитывающая влияние надежности оборудования. При этом, исходя из характера поставленных задач, удобства описания, а также конструктивных и функциональных особенностей ТСИР, ее функционирование описано на трех следующих стратах: страта измельчительных агрегатов (ИА), страта измельчительных комплексов (ИК) и системная страта. В результате применения предложенной формализации построен трехуровневый граф  $G(E, V)$ , на основе которого построены модели  $S_i^\mu, i \in I^\mu, \mu \in I = \{1, 2, 3\}$  подсистем различных уровней  $E_i^\mu, i \in I^\mu, \mu \in I$  и модель их сопряжения следующим образом.

*Страта измельчительных агрегатов.* На данной страте ТСИР представлена совокупностью  $p_1 = 32$  ИА - подсистем первого уровня  $E_i^1, i \in I^1 = \{1, 2, \dots, p_1\}$ , полученных в результате декомпозиции системы, состоящей из  $p_0 = 86$  элементов  $E_i^0, i \in I^0 = \{1, 2, \dots, p_0\}$ . Каждая подсистема  $E_i^1$  первого уровня рассмотрена как объект с двумя возможными состояниями и формализована в виде ВССБП  $S_i^1$ , описываемой множествами  $X_i^1, Y_i^1, T_i^1$  и оператором  $H_i^1$ , реализующим отображение  $X_i^1 \rightarrow Y_i^1$ . Множество  $X_i^1$  входных сигналов представляет собой декартово произведение множеств  $\{0; 1\}$  выходных сигналов тех элементов  $E_j^0, j \in I^0$ , которые составляют подсистему  $E_i^1$ . Множество  $Y_i^1$  выходных сигналов включает два элемента (0 - состояние отказа, 1 - работоспособное состояние). Оператор  $H_i^1$  представляет собой логическую функцию работоспособности подсистемы  $E_i^1$ , описывающую условие работоспособности данной подсистемы в зависимости от работоспособности входящих в ее состав элементов (например, для  $E_{19}^1$  оператор  $H_{19}^1$  имеет вид:  $y_{19}^1 = H_{19}^1(x_{19}^1) = x_{19,1}^1 \wedge x_{19,2}^1 \wedge (x_{19,3}^1 \vee x_{19,4}^1)$ ).

*Страта измельчительных комплексов.* На этой страте ТСИР представлена в виде совокупности  $p_2 = 10$  измельчительных комплексов – подсистем второго уровня  $E_i^2, i \in I^2 = \{1, 2, \dots, p_2\}$ . Каждый ИК, в зависимости от работоспособности входящих в его состав или влияющих на его работу ИА, может работать в одном из технологически возможных режимов, характеризующемся конкретным

набором значений его выходных характеристик  $y_i^2 = (y_{i,1}^2, y_{i,2}^2, y_{i,3}^2)$ , где  $y_{i,1}^2$  – производительность комплекса,  $y_{i,2}^2$  – процентное содержание класса  $\leq 80$  мкм в измельченном продукте (пульпе),  $y_{i,3}^2$  – плотность выходной пульпы.

Обозначим через  $x_i^2(t) = (x_{i,1}^2(t), x_{i,2}^2(t), \dots, x_{i,n}^2(t))$  совокупность выходных характеристик состояний в момент  $t$  тех ИА, от работоспособности которых зависит выбор структуры и режима работы ИК  $E_i^2$ . В каждый момент времени  $t$ , когда происходит изменение работоспособности ИА, в соответствии со значением вектора  $x_i^2(t)$  происходит перестроение структуры комплекса  $E_i^2$  и переход в новый режим работы, характеризуемый новым значением вектора  $y_i^2(t)$ . Каждый ИК  $E_i^2$  формализован в виде ВССБП  $S_i^2$ , входной сигнал  $x_i^2(t)$  которой представляет собой упорядоченную совокупность выходных сигналов соответствующих подсистем первого уровня. а выходной сигнал-вектор выходных характеристик  $y_i^2(t) = (y_{i,1}^2(t), y_{i,2}^2(t), y_{i,3}^2(t))$  ИК  $E_i^2$ . Множество  $Y_i^2$  элемента  $S_i^2$  представляет собой совокупность значений вектора выходных характеристик подсистемы  $E_i^2$ , соответствующих всевозможным режимам ее работы. Каждый оператор  $H_i^2$ , реализующий отображение  $X_i^2 \rightarrow Y_i^2$ , представляет собой бинарную поисковую признаковую структуру–алгоритм, который по заданному входному сигналу  $x_i^2(t) \in X_i^2$ , описывающему работоспособность входящих в состав подсистемы  $E_i^2$  и влияющих на ее функционирование подсистем первого уровня, осуществляет поиск и выдачу соответствующего выходного сигнала  $y_i^2(t) \in Y_i^2$ . Например, структура оператора  $H_5^2$  представлена на рис. 2.

*Системная страта.* На данной страте ТСИР рассматривается как одна крупная подсистема  $E_1^3$  третьего уровня, представляющая собой смеситель (пульподелитель), входом которого является совокупность выходных продуктов всех измельчительных комплексов, а выходом – объединенная выходная пульпа, поступающая на флотацию. Обозначим через  $y_{1,1}^3(t)$ ,  $y_{1,2}^3(t)$ ,  $y_{1,3}^3(t)$  значения выходных характеристик подсистемы  $E_1^3$  в момент времени  $t$ : ее производительность, процентное содержание класса  $\leq 80$  мкм и плотность

объединенной пульпы. Соответствующие характеристики входных потоков обозначим через  $x_{i,1}^3(t) = y_{i,1}^2(t)$ ,  $x_{i,2}^3(t) = y_{i,2}^2(t)$ ,  $x_{i,3}^3(t) = y_{i,3}^2(t)$ ,  $i \in I^2$ .

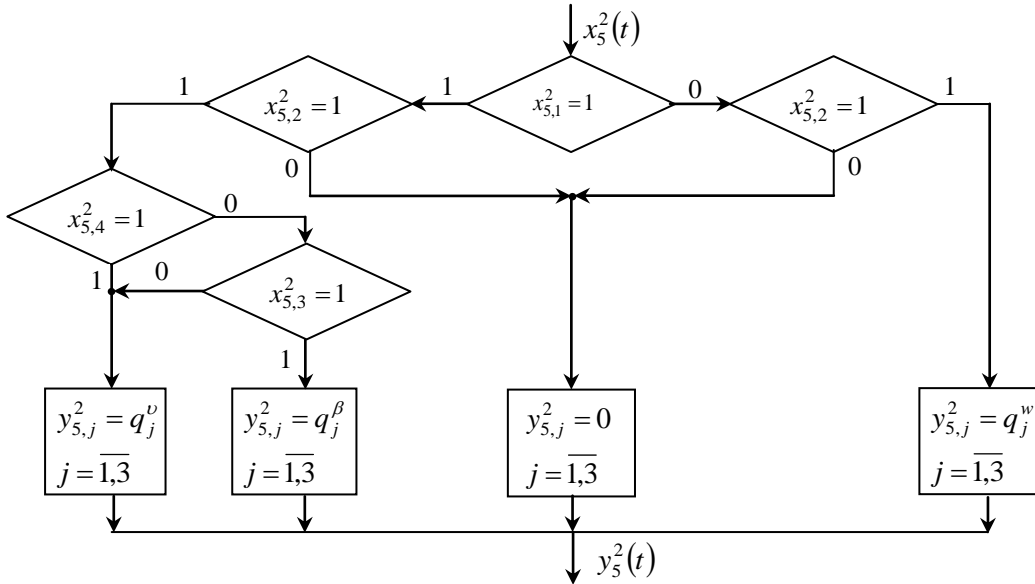


Рис. 2. Структура оператора  $H_5^2$

Показано [7], что общая производительность ТСИР  $y_{1,1}^3(t)$ , процент содержания класса  $\leq 80 \text{ мкм}$   $y_{1,2}^3(t)$  в объединенной пульпе и ее плотность  $y_{1,3}^3(t)$  связаны с характеристиками отдельных комплексов следующими соотношениями, реализующими отображение  $X_1^3 \rightarrow Y_1^3$ :

$$y_{1,1}^3(t) = \sum_{i=1}^{10} x_{1,i}^3(t); \quad y_{1,2}^3(t) = \left[ \sum_{i=1}^{10} x_{1,i}^3(t) \cdot x_{1,(i+10)}^3(t) \right] / \sum_{i=1}^{10} x_{1,i}^3(t),$$

$$y_{1,3}^3(t) = \left[ \sum_{i=1}^{10} \frac{x_{1,i}^3(t) \cdot x_{1,(i+20)}^3(t)}{x_{1,(i+20)}^3(t) - 1000} \right] / \sum_{i=1}^{10} \frac{x_{1,i}^3(t)}{x_{1,(i+20)}^3(t) - 1000}.$$

На основании графа  $G(E, V)$  построена блок-схема СИСС (рис. 3), которая использована для построения математической модели сопряжения элементов.

Имитационная программа составлена с использованием языка C++, включает около 350 операторов и реализована на Pentium i7. Разработанная модель использована в составе имитационной модели, ориентированной на исследование эффективности функционирования ТСИР с учетом надежности оборудования [7] и в составе компьютерной модели для стохастического управления процессом флотации медно-молибденовой руды [9].

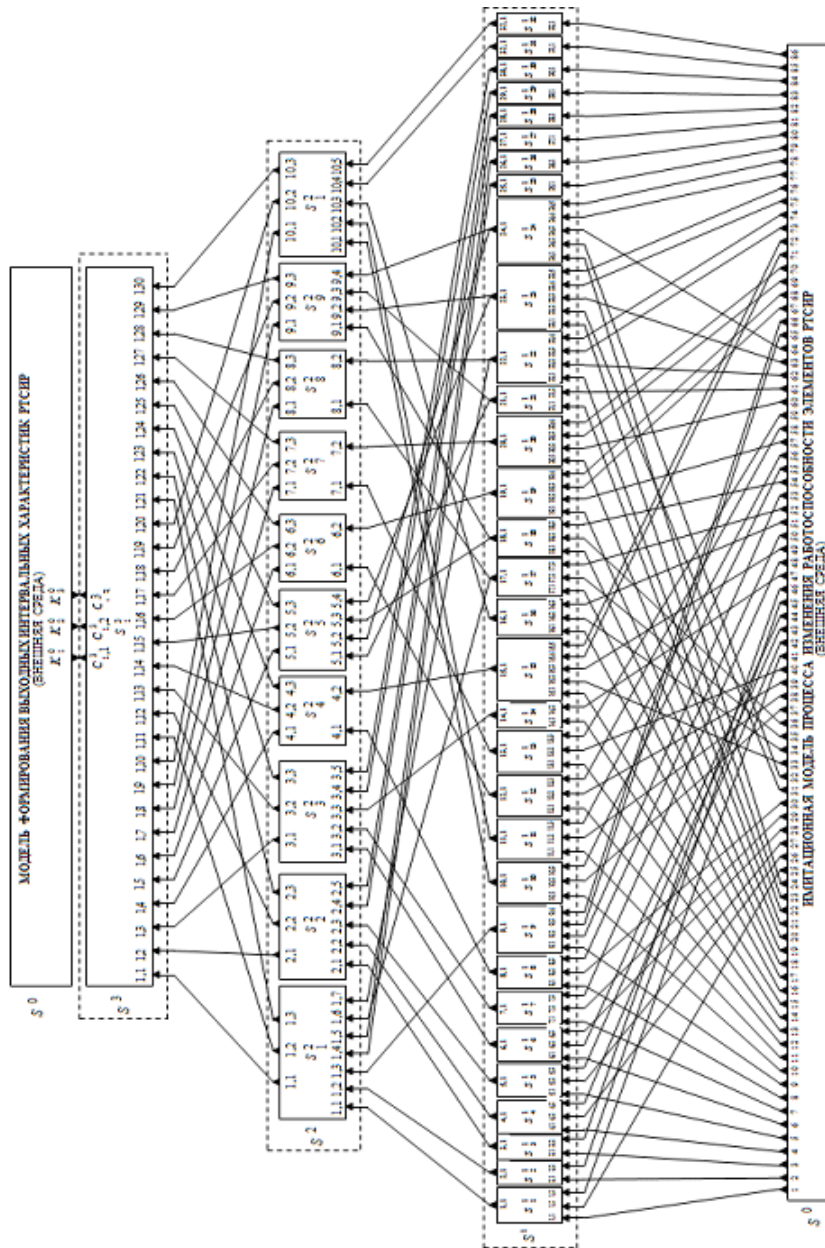


Рис. 3. Структура стратифицированной модели ТСИР

**Заключение.** Разработан проблемно ориентированный метод стратифицированной формализации, позволяющий преодолеть сложность формализации определенного класса САТС с пространством состояний большой размерности, разработать удобную компьютерную модель сопряжения их элементов и распараллеливать процесс имитации функционирования элементов каждой страты. Практическое применение предложенного метода формализации позволило свести описание ТСИР к описанию ее частей и их сопряжения, предоставляя также возможность аналитического описания системы на первой и третьей стратах, в результате чего построение компьютерной модели системы в целом существенно упростилось. Благодаря этому объем натурных экспериментов, необходимых для построения модели ТСИР, в целом резко сократился, что, в свою очередь, привело к значительному сокращению сроков и трудоемкости построения компьютерной модели системы.

#### Литература

1. **Lisnianski A., Levitin G.** Multi-state System Reliability: Assessment, Optimization and Application. – Singapore: World Scientific, 2003. – 358 p.
2. **Levitin G., Frenkel I., Dong Y.** Multi-state System Reliability Analysis and Optimization for Engineers and Industrial Managers. - Springer, 2010.- 393 p.
3. **Ушаков И.** О важности адекватных математических моделей при инженерном анализе надежности // Надежность.- 2011.- № 3.- С. 3-15.
4. **Rubinstein R., Kroese D.** Simulation and the Monte Carlo Method.- 2nd Edition. – Wiley, 2008. - 372 p.
5. **Месарович М., Мако Д., Такахара И.** Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
6. **Месарович М., Такахара И.** Общая теория систем: математические основы. – М., 1978. – 311 с.
7. **Баласания С.Ш.** Стратифицированная модель для оценки и анализа эффективности функционирования сложных технологических систем со многими состояниями // Известия ТПУ. - Томск, 2011. - Т. 318, №5. - С. 271-277.
8. **Баласания С.Ш.** Компьютерная модель сопряжения элементов в строго-иерархической стратифицированной системе // Известия ТПУ.- Томск, 2012.- Т. 321, № 5.- С. 14-19.
9. **Баласания С.Ш., Симонян С.О., Геворгян Э.М.** Компьютерная модель для стохастического управления ТП флотации руды с учетом надежности измельчительного обораудования // Известия ТПУ.- Томск, 2013.- Т. 323, № 5.- С. 50-57.

*Поступила в редакцию 27.09.2015.  
Принята к опубликованию 25.11.2015.*

**ԲԱՐԴ ԲԱԶՄԱՎԻՃԱԿ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ  
ՍՏՐԱՏԻՖԻԿԱՑՎԱԾ ՁԵՎԱՅՆԱՑՄԱՆ ՊՐՈԲԼԵՄԱԿՈՂՄՆՈՐՈՇՎԱԾ ՄԵԹՈԴ**

**Ս.Շ. Բալասանյան**

Առաջարկված են բարդ բազմավիճակ տեխնոլոգիական համակարգերի ստրատիֆիկացված ձևայնացման պրոբլեմակողմնորոշված մեթոդ և դրանց արդյունավետության գնահատման ու հետազոտման համար նախատեսված ընդհանրական ստրատիֆիկացված մոդել: Առաջարկված ձևայնացման մեթոդի կիրառմամբ մշակվել է հանքաքարի մանրացման տեխնոլոգիական համակարգի (ՀՄՏՀ) ստրատիֆիկացված մոդել, որը նկարագրում է սարքավորման խափանումների և վերականգնումների պատահական գործընթացի ազդեցության ներքո համակարգի գործունեության գործընթացը մանրացնող ագրեգատների, մանրացնող համալիրների և համակարգային մակարդակների վրա: Առաջարկված ձևայնացման մեթոդի կիրառությունը թույլ է տվել ՀՄՏՀ-ի նկարագրությունը հանգեցնել համակարգի մասերի և դրանց լծորդման նկարագրությանը՝ հնարավորություն ընձեռելով անալիտիկորեն նկարագրելու համակարգի գործունեությունն առաջին և երրորդ մակարդակներում:

**Առանցքային բառեր.** պրոբլեմակողմնորոշված մեթոդ, ստրատիֆիկացված ձևայնացում, հուսալիություն, հանքաքար, մանրացում, մոդելավորում, գործունեություն:

**A PROBLEM-ORIENTED METHOD FOR STRATIFIED FORMALIZATION  
OF MULTISTATE COMPLEX TECHNOLOGICAL SYSTEMS**

**S.Sh. Balasanyan**

A problem-oriented method of stratified formalization and a generalized stratified model for assessing and analyzing the functioning efficiency of complex multistate technological systems are proposed. By using the proposed method of formalization, a stratified computer model of the technological system of ore grinding (TSOG), describing the process of its functioning under the influence of the random process of failures and the recovery of the broken down equipment at the levels of the grinding aggregates, grinding complexes, and at the system level. The application of the proposed method of formalization allowed to bring the TSOG description to the description of its parts and their integration, giving an opportunity to analytically describe the system at the first and third levels.

**Keywords:** problem-oriented method, stratified formalization, reliability, ore, grinding, modeling, functioning.

УДК 62-50

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ОДНОТИПНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ БИЛИНЕЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

О.Н. Гаспарян, О.Г. Оганян

Национальный политехнический университет Армении

Рассмотрены вопросы исследования на основе билинейного преобразования (в области  $\varpi$ ) дискретных одноканальных систем регулирования, т.е. многомерных систем с одинаковыми передаточными функциями отдельных каналов и жесткими взаимными связями. Показано, что применение метода характеристических передаточных функций позволяет свести исследование дискретных одноканальных систем с произвольным числом каналов  $N$  к исследованию  $N$  фиктивных одномерных систем с комплексными коэффициентами. Указаны основные свойства частотных характеристик и корневых годографов дискретных одноканальных систем регулирования в области  $\varpi$ . Приведен числовой пример анализа трехмерной одноканальной системы и дано сравнение корневых годографов дискретной и соответствующей непрерывной систем.

**Ключевые слова:** многомерная дискретная система, одноканальная система, период прерывания,  $\varpi$ -преобразование, устойчивость, характеристическая передаточная функция, частотные характеристики, корневые годографы.

**Введение.** В различных технических приложениях, например таких, как аэрокосмическая техника, химическая и сталелитейная промышленность и др., широко распространены многомерные одноканальные системы автоматического регулирования (МОСАР) [1]. В МОСАР отдельные каналы имеют одинаковые передаточные функции, а взаимные связи между каналами являются жесткими и характеризуются квадратной числовой матрицей.

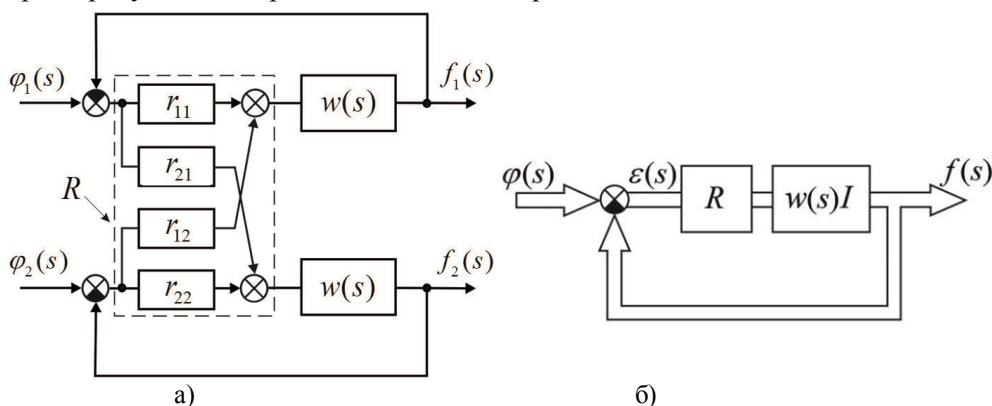


Рис. 1. Развернутая (при  $N = 2$ ) (а) и матричная (б) структурные схемы непрерывной МОСАР

Общая структурная схема на рис. 1б при этом преобразуется к виду на рис. 2, где все переменные и передаточная функция  $w(z)$  даны в форме  $z$ -преобразования [2].

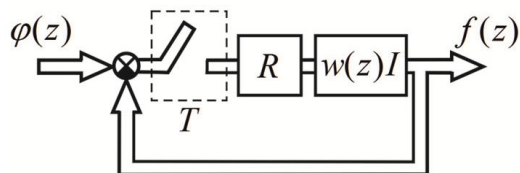


Рис. 2. Матричная структурная схема дискретной МОСАР

В настоящее время имеется обширная научно-техническая литература, посвященная методам проектирования и исследования дискретных систем регулирования с одним входом и одним выходом (одномерных систем). Вместе с тем относительно мало внимания уделяется теории и методам исследования многомерных дискретных систем регулирования. Более того, практически полностью отсутствуют публикации, в которых учитываются структурные особенности *многомерных* дискретных систем. В предлагаемой статье на основе метода характеристических передаточных функций (ХПФ) [1] рассматриваются частотные и корневые методы проектирования дискретных МОСАР в области  $\varpi$ -преобразования, известного также как билинейное преобразование [2]. Подобный подход позволяет максимально приблизить методы исследования дискретных МОСАР с произвольным числом каналов  $N$  к стандартным методам исследования одномерных дискретных систем.

**1. Билинейное преобразование.** Комплексная переменная  $z$  связана с переменной Лапласа  $s$  известным выражением

$$z = \exp(sT). \quad (1)$$

Эта функция отображает мнимую ось  $s = j\omega$  комплексной плоскости  $s$  в окружность единичного радиуса на плоскости  $z$  (рис. 3а,б) [2]. Левая полу-плоскость плоскости  $s$  при этом отображается внутрь этой окружности. Более строго, внутрь окружности единичного радиуса отображаются *основная* полоса, имеющая ширину от  $-\omega_s/2$  до  $+\omega_s/2$  (затемненная область на рис. 3а), а также *дополнительные* полосы шириной  $\omega_s$ . Это следует из того, что при  $z = \sigma + j\omega$  и  $\sigma = const$  передаточная функция  $w(z)$ , исходя из вида выражения (1), является периодической функцией частоты  $\omega$  с периодом  $\omega_s = 2\pi/T$ . Для устойчивости дискретной системы, заданной в области  $z$ , необходимо и достаточно, чтобы корни характеристического уравнения системы лежали на плоскости  $z$  внутри окружности единичного радиуса (рис. 3б) [2].

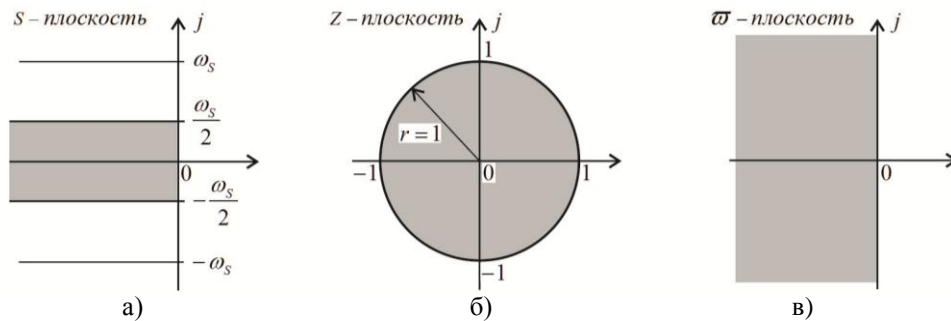


Рис. 3. отображения комплексных плоскостей  $s$ ,  $z$  и  $w$

Однако дискретные передаточные функции  $w(z)$ , хотя и представляют собой рациональные функции от  $z$ , не позволяют применять такие важные методы классической теории регулирования, как логарифмические частотные характеристики [3]. Этот недостаток отсутствует в методе, предложенном в [4], который основан на использовании билинейного преобразования, имеющего вид

$$z = \frac{1 + (T/2)w}{1 - (T/2)w}. \quad (2)$$

Функция (2) конформно отображает внутреннюю часть единичной окружности на плоскости  $z$  в левую полуплоскость плоскости  $w = u + jv$ , а саму единичную окружность – в мнимую ось плоскости  $w$  (рис. 3в). Обратный переход от плоскости  $w$  к плоскости  $z$  осуществляется, исходя из (2), при помощи выражения

$$w = \frac{2(1 - z^{-1})}{T(1 + z^{-1})}. \quad (3)$$

Переход от рациональной передаточной функции  $w(z)$  к передаточной функции  $w(w)$  осуществляется при помощи выражения (2). При этом дискретная система устойчива, если все полюсы передаточной функции  $w(w)$  находятся в левой полуплоскости комплексной плоскости  $w$ . При подстановке  $s = j\omega$  в выражение (3) оно принимает с учетом (1) вид

$$w = \frac{2[1 - \exp(-j\omega T)]}{T[1 + \exp(-j\omega T)]} = j\nu, \quad \nu = \frac{2}{T} \operatorname{tg} \frac{\omega T}{2}, \quad (4)$$

где переменная  $\nu$  называется *фиктивной* частотой. При  $s = j\omega$  комплексная переменная  $w$  (4) является мнимой величиной. Из выражения для фиктивной частоты  $\nu$  в (4) видно, что она является периодической функцией от  $\omega$  с периодом, равным частоте прерывания  $\omega_s$ . Если действительная частота  $\omega$  увеличивается от 0 до  $\omega_s/2$ , то фиктивная частота  $\nu$  изменяется от 0 до  $\infty$ . Если

$\omega$  увеличивается от  $\omega_s/2$  до  $\omega_s$ , то  $\nu$  возрастает от  $-\infty$  до 0. Этот процесс повторяется при  $\omega > \omega_s$ . Отметим, что при малых значениях  $\omega$ , при которых  $\operatorname{tg}(\omega T/2) \approx \omega T/2$ , фиктивная  $\nu$  и действительная  $\omega$  частоты приблизительно совпадают. Таким образом, при последовательном применении  $z$ - и  $\varpi$ -преобразований основная полоса комплексной плоскости  $s$  на рис. 3а отображается во всю левую половину плоскости  $\varpi$  (рис. 3в). Данное обстоятельство позволяет применять к передаточным функциям  $w(\varpi)$  классический метод логарифмических частотных характеристик [3]. Среди важных свойств передаточной функции  $w(\varpi)$  следует указать, что она является рациональной функцией переменной  $\varpi$ . Если предположить, что передаточная функция  $w(z)$  с  $m$  нулями  $z_i$  и  $n$  полюсами  $p_i$ , где  $m \leq n$ , задана в виде

$$w(z) = \frac{K \prod_{i=1}^m (z - z_i)}{\prod_{i=1}^n (z - p_i)}, \quad (5)$$

то можно показать, что соответствующее представление  $w(\varpi)$  имеет вид

$$w(\varpi) = \frac{K_\varpi \left(-\frac{T}{2}\varpi + 1\right)^{(n-m)} \prod_{i=1}^m (\varpi - z_i^\varpi)}{\prod_{i=1}^n (\varpi - p_i^\varpi)}, \quad (6)$$

где

$$K_\varpi = \frac{(-1)^{n-m} K \prod_{i=1}^m (1 + z_i)}{\prod_{i=1}^n (1 + p_i)}, \quad z_i^\varpi = -\frac{2(1 - z_i)}{T(1 + z_i)}, \quad p_i^\varpi = -\frac{2(1 - p_i)}{T(1 + p_i)}. \quad (7)$$

Из (6) и (7) видно, что число нулей и полюсов  $w(\varpi)$  всегда одинаково, независимо от числа нулей и полюсов передаточной функции  $w(z)$  (5). Это означает, что при  $\varpi = j\infty$  величина  $w(\varpi)$  действительна и конечна. Кроме того, при  $n > m$  передаточная функция  $w(\varpi)$  является неминимально-фазовой, так как имеет  $n - m$  положительных действительных нулей в точке  $\varpi = 2/T$ . Наконец, при нечетных  $n - m$  коэффициент  $K_\varpi$  в (6) является отрицательным числом, что эквивалентно переходу к положительной обратной связи.

**2. Канонические представления дискретных МОСАР в области  $\varpi$ .** Передаточная матрица  $N$ -мерной дискретной разомкнутой МОСАР на рис. 2 в области  $\varpi$  имеет вид

$$W(\varpi) = w(\varpi)R. \quad (8)$$

На основании метода ХПФ [1] данную передаточную матрицу можно представить при помощи преобразования подобия в следующем каноническом виде:

$$W(\varpi) = C \operatorname{diag}\{\lambda_i w(\varpi)\} C^{-1}, \quad (9)$$

где  $\lambda_i (i=1,2,\dots,N)$  есть собственные значения числовой матрицы взаимных связей  $R$ ;  $C$  - модальная матрица, составленная из  $N$  линейно-независимых собственных векторов  $c_i$  (осей канонического базиса МОСАР) матрицы  $R$ . Заметим, что собственные значения  $\lambda_i$  вещественной матрицы  $R$  могут быть как действительными, так и комплексными числами, причем комплексные  $\lambda_i$  всегда должны быть комплексно-сопряженными [1].

Скалярные функции

$$q_i(\varpi) = \lambda_i w(\varpi) \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (10)$$

в (9) называются ХПФ дискретной разомкнутой МОСАР или передаточными функциями одномерных характеристических систем. На основании выражений (9) и (10) можно сделать вывод, что, во-первых, канонический базис дискретной МОСАР полностью определяется числовой матрицей  $R$  и не зависит от вида  $w(\varpi)$ ; во-вторых, все ХПФ  $q_i(\varpi)$  (10) совпадают с точностью до постоянных “коэффициентов усиления”  $\lambda_i$  с дискретной передаточной функцией  $w(\varpi)$ .

Передаточная матрица замкнутой МОСАР в области  $\varpi$  при этом имеет вид

$$\Phi(\varpi) = [I + W(\varpi)]^{-1} W(\varpi) = C \operatorname{diag}\left\{\frac{\lambda_i w(\varpi)}{1 + \lambda_i w(\varpi)}\right\} C^{-1}, \quad (11)$$

а устойчивость замкнутой системы определяется распределением корней характеристического уравнения

$$\det[1 + w(\varpi)R] = \prod_{i=1}^N [1 + \lambda_i w(\varpi)] = 0. \quad (12)$$

Отметим, что из сравнения (9) и (11) следует, что канонические базисы (модальные матрицы  $C$ ) разомкнутой и замкнутой дискретной МОСАР совпадают, а ХПФ  $q_i(\varpi)$  разомкнутой и ХПФ

$$\phi_i(\varpi) = \frac{\lambda_i w(\varpi)}{1 + \lambda_i w(\varpi)} = \frac{q_i(\varpi)}{1 + q_i(\varpi)} \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (13)$$

замкнутой МОСАР связаны теми же зависимостями, что и передаточные функции обычных разомкнутых и замкнутых систем с одним входом и выходом. Как указывалось выше, для устойчивости замкнутой дискретной МОСАР необходимо и достаточно, чтобы все корни уравнения (12) находились в левой полуплоскости комплексной плоскости  $\varpi$  (рис. 3в).

Уравнение (12), очевидно, эквивалентно системе  $N$  уравнений

$$1 + \lambda_i w(\varpi) = 0 \quad (i=1,2,\dots,N), \quad (14)$$

совпадающих с характеристическими уравнениями замкнутых одномерных характеристических систем. Рассмотрение уравнений (12) и (14) показывает, что применение канонического представления дискретной МОСАР в области  $\varpi$  позволяет свести исследование устойчивости взаимосвязанной МОСАР к исследованию устойчивости  $N$  одномерных характеристических систем с передаточными функциями  $q_i(\varpi)$  (10). Исследование последних при этом можно проводить на основе обычных методов классической теории дискретных систем регулирования с одним входом и выходом [2].

**3. Частотные характеристики дискретных МОСАР в области  $\varpi$ .** Для анализа устойчивости дискретных одномерных систем в области  $\varpi$  применим частотный критерий Найквиста [2], согласно которому, если разомкнутая система с передаточной функцией  $w(\varpi)$  устойчива, то для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы действительная величина  $w(j\infty)$  была больше минус единицы, т.е.  $w(j\infty) > -1$ . На основании уравнений (12) и (14) данный критерий применим и к одномерным характеристическим системам с передаточными функциями  $q_i(\varpi)$  (10). Здесь, однако, следует иметь в виду, что собственные значения  $\lambda_i$  матрицы  $R$  могут быть как действительными, так и комплексными числами. В первом случае обычная формулировка критерия Найквиста остается прежней, так как величина  $q_i(j\infty)$  при этом является действительной. Что касается комплексно-сопряженных  $\lambda_k$  и  $\lambda_{k+1} = \tilde{\lambda}_k$ , то в данном случае соответствующие величины  $q_k(j\infty)$  и  $q_{k+1}(j\infty)$  также являются комплексно-сопряженными. Поэтому условием устойчивости при этом является нахождение точек  $q_k(j\infty)$  и  $q_{k+1}(j\infty)$  внутри окружности единичного радиуса на плоскости  $\varpi$ . Укажем, что для исследования дискретных МОСАР в области  $\varpi$  можно также использовать диаграммы Никольса и логарифмические частотные характеристики [3]. Поскольку величина  $w(j\infty)$  всегда действительна и конечна, то высокочастотные участки логарифмических характеристик ХПФ  $q_i(\varpi)$  (10) всегда горизонтальны.

**4. Корневые годографы дискретных МОСАР в области  $\varpi$ .** Напомним, что корневые годографы представляют собой траектории корней замкнутой системы при изменении коэффициента усиления разомкнутой системы от 0 до  $\infty$  [3]. Метод корневых годографов относится к наиболее распространенным методам анализа и проектирования непрерывных и дискретных одномерных систем. В [1] этот метод распространяется на непрерывные многомерные системы различных структурных классов, включая однотипные системы. Ниже

даны общие правила построения подобных корневых годографов с учетом основных особенностей передаточных функций  $w(\varpi)$ .

При построении корневых годографов дискретная МОСАР представляется в виде, представленном на рис. 4, где передаточная матрица  $W(\varpi)$  дается выражением (8), а вещественный скаляр  $k$  изменяется от 0 до  $\infty$ .

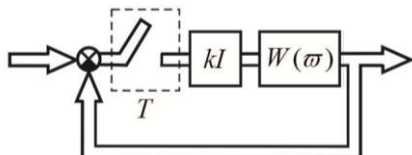


Рис. 4. К построению корневых годографов дискретной МОСАР

Характеристическое уравнение дискретной МОСАР на рис. 4 имеет вид

$$\det[1 + kW(\varpi)] = \prod_{i=1}^N [1 + k\lambda_i w(\varpi)] = 0. \quad (15)$$

Это уравнение, очевидно, эквивалентно системе уравнений

$$kw(\varpi) = -\frac{1}{\lambda_i} = -\frac{1}{|\lambda_i|} \exp\{-j \arg \lambda_i\} \quad (i=1, 2, \dots, N), \quad (16)$$

откуда следуют следующие условия образования траекторий корней дискретной МОСАР в области  $\varpi$  для  $i$ -й характеристической системы:

$$|kw(\varpi)| = \frac{1}{|\lambda_i|}, \quad \arg w(\varpi) = \pm(2r+1)180^\circ - \arg \lambda_i \quad (r=0, 1, 2, \dots) \quad (17)$$

Из (16) и (17) вытекают следующие условия образования траекторий корней дискретной МОСАР на рис. 4.

**Правило 1. Число траекторий корней.** Число траекторий корней  $N$ -мерной дискретной МОСАР равно  $N \cdot n$ , где  $n$  - число полюсов передаточной функции отдельных каналов  $w(\varpi)$  (6).

**Правило 2. Начало и конец траекторий корней.** При  $k=0$  траектории корней каждой характеристической системы начинаются в  $n$  полюсах  $p_i^\varpi$  передаточной функции  $w(\varpi)$  и кончаются при  $k=\infty$  в  $n$  нулях  $w(\varpi)$ .

**Правило 3. Число траекторий, стремящихся к бесконечности.** Поскольку число нулей и полюсов  $w(\varpi)$  всегда одинаково, то траектории корней МОСАР в области  $\varpi$  не имеют ветвей, стремящихся к бесконечности, независимо от числа нулей и полюсов непрерывной передаточной функции  $w(s)$ . В этом заключается принципиальное отличие траекторий корней дискретной МОСАР в области  $\varpi$  от случая непрерывных МОСАР или дискретных МОСАР в области  $\varpi$

$z$  [1], где число траекторий корней, стремящихся к бесконечности, равно  $N(n-m)$ . Укажем, что в области  $\varpi$   $n-m$  траекторий корней каждой характеристической системы стремятся при  $k \rightarrow \infty$  к  $n-m$  правосторонним нулям в точке  $s=2/T$ . Если коэффициент  $K_{\varpi}$  в (6) имеет отрицательное значение, т.е.  $n-m$  является нечетным числом, то корневые годографы имеют ветви, проходящие через бесконечность при некотором конечном значении  $k$  [5]. Кроме того, сами годографы при этом соответствуют системе с *положительной* обратной связью.

Правило 4. *Совпадающие симметричные траектории корней.* Траектории корней одномерных характеристических систем, соответствующие всем вещественным собственным значениям  $\lambda_i$  матрицы  $R$ , симметричны относительно действительной оси, совпадают между собой и совпадают с траекториями корней изолированных каналов дискретной МОСАР. Данное свойство становится очевидным при рассмотрении фазового условия в (17), которое при действительных  $\lambda_i$ , т.е. при  $\arg \lambda_i = 0$ , переходит в аналогичное условие для обычных систем регулирования с передаточной функцией  $w(\varpi)$ .

Правило 5. *Комплексно-сопряженные траектории корней.* Траектории корней характеристических систем с комплексно-сопряженными собственными значениями  $\lambda_i$  несимметричны относительно действительной оси. Все такие траектории получаются одна из другой зеркальным отображением относительно указанной оси.

Правило 6. *Траектории корней на действительной оси.* Дискретная МОСАР может иметь траектории корней, совпадающие с интервалами действительной оси только при наличии вещественных  $\lambda_i$ . В этом случае такими интервалами при  $K_{\varpi} > 0$  будут участки, расположенные левее *нечетных* особых точек (полюсов или нулей) передаточной функции  $w(\varpi)$  [1]. При  $K_{\varpi} < 0$  участки траекторий на действительной оси находятся правее особых точек  $w(\varpi)$  [5]. Что касается характеристических систем с комплексными  $\lambda_i$ , то такие системы не могут иметь участков траекторий корней на действительной оси. Это видно из условий (16), которые не могут удовлетворяться при комплексных  $\lambda_i$  и вещественных  $\varpi$ , когда вещественной становится передаточная функция  $w(\varpi)$ .

Правило 7. *Значение параметра  $k$ .* Значение параметра  $k$ , соответствующее произвольной точке  $\varpi_0$  на траектории корней  $i$ -й характеристической системы, находится из (17) и равно:  $k = 1/|\lambda_i w(\varpi_0)|$ .

Перечисленные правила позволяют проводить построение корневых годографов дискретной МОСАР в области  $\varpi$  известными методами [2].

**5. Пример.** В качестве числового примера рассмотрим непрерывную трехмерную МОСАР с передаточной функцией отдельных каналов

$$w(s) = \frac{s + 2}{s(s + 1)(s + 3)} \quad (18)$$

и матрицей жестких взаимных связей

$$R = \begin{pmatrix} 0,9 & 0,03 & -0,01 \\ -0,05 & 0,866 & 0,5 \\ 0,02 & -0,5 & 0,866 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

собственные значения которой равны  $\lambda_1 = 0,9$ ,  $\lambda_{2,3} = 0,866 \pm j0,502$ . Если ввести в отдельные каналы этой системы синхронные импульсные элементы с периодом прерывания  $T = 0,2$  с и фиксаторами нулевого порядка [2], то  $z$ -преобразование передаточной функции  $w(s)$  (18) дает

$$w(z) = \frac{0,0176(z - 0,67)(z + 0,876)}{(z - 1)(z - 0,819)(z - 0,549)}, \quad (20)$$

а соответствующая передаточная функция  $w(\varpi)$  (6) имеет вид

$$w(\varpi) = \frac{-0,64864 \cdot 10^{-3}(s + 1,974)(s - 10)(s + 151,2)}{s(s + 0,9967)(s + 2,913)}. \quad (21)$$

На рис. 5а,б показаны логарифмические частотные характеристики и общий вид корневых годографов дискретной системы в области  $\varpi$ .

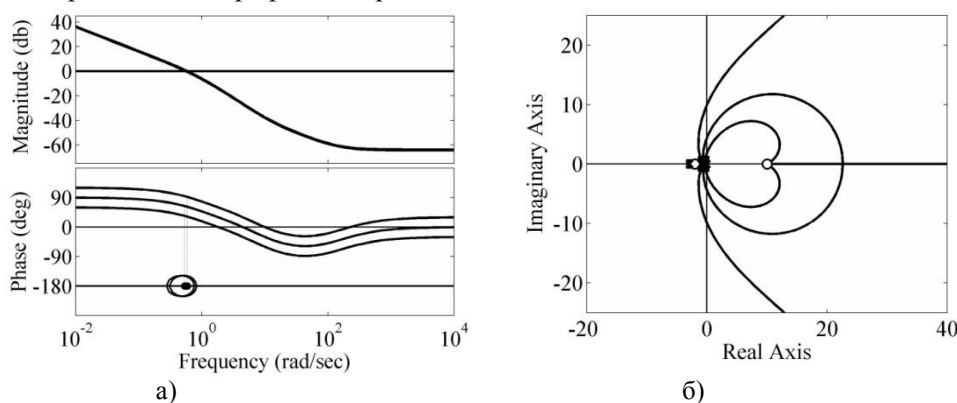


Рис. 5. Дискретная МОСАР с матрицей  $R$  (19) и передаточной функцией  $w(\varpi)$  (21): а - логарифмические частотные характеристики; б - общий вид корневых годографов

Ввиду отрицательного коэффициента усиления в  $w(\varpi)$  (21) годографы на

рис. 5б имеют одну ветвь на вещественной оси, проходящую через бесконечность при  $k = k_{Cr} = 1541,8$ . Как видно из рис. 5, дискретная МОСАР с передаточной функцией  $w(z)$  (21) устойчива.

На рис. 6а показаны корневые годографы соответствующей непрерывной системы с передаточной функцией  $w(s)$  (18), а на рис. 6б - корневые годографы на рис. 5б в том же масштабе, что и на рис. 6а, где корни замкнутых систем показаны черными квадратиками.

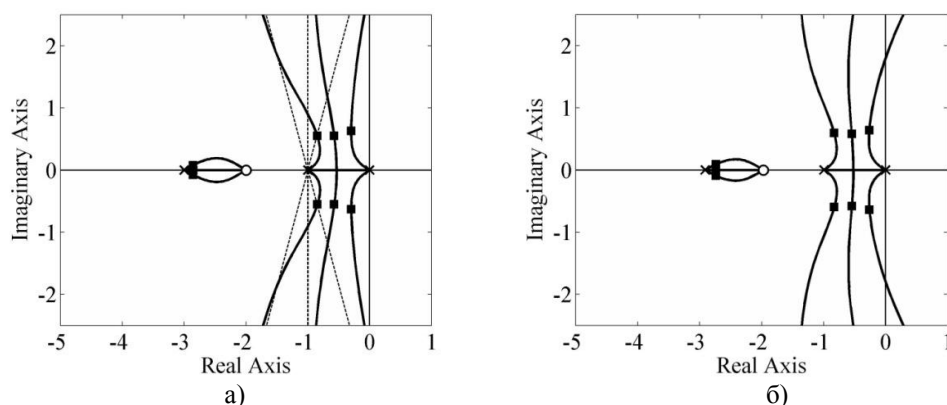


Рис. 6. Сравнение корневых годографов непрерывной (а) и дискретной (б) МОСАР

Сравнение этих годографов показывает их схожесть, но правые ветви годографов на рис. 6б более искривлены в сторону правой полуплоскости, что свидетельствует о меньших запасах устойчивости дискретной МОСАР. Графики на рис. 5 и 6 были получены при помощи разработанного пакета программ на языке *MATLAB* [6], предназначенного для компьютерного исследования дискретных многомерных систем произвольной размерности.

**Заключение.** Таким образом, применение метода ХПФ позволило свести исследование частотных и корневых характеристик дискретных МОСАР с произвольным числом каналов  $N$  в области  $z$  к исследованию  $N$  дискретных одномерных характеристических систем, имеющих в общем случае комплексные параметры.

#### Литература

1. **Gasparyan O.N.** Linear and Nonlinear Multivariable Feedback Control: A Classical Approach.- John Wiley & Sons, UK, 2008.- 354 p.
2. **Moudgalya K.M.** Digital Control.- John Wiley & Sons, UK, 2007.- 543 p.
3. **Dorf R.C., Bishop R.** Modern Control Systems.- Addison-Wesley Publishing Co., Reading, MA, 2007.- 1046 p.
4. **Johnson G.W., Lindorff D.P. and Nordling C.G.A.** Extension of Continuous Data System Design Techniques to Sampled Data Control Systems // Trans. AIEE.- Sept., 1955.- V. 74, pt. II.- P. 252-266.

5. **Gasparyan O.N., Ali Eydgahi.** On Behavior of Root Loci of Uniform and Circulant Multivariable Control Systems // Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design, September 3-5, 2008.- San Antonio, Texas, USA, 2009.- P. 1067-1072.
6. *Using MATLAB:* The MathWorks, Inc.- South Natic, 2014.- 865 p.

*Поступила в редакцию 03.10.2015.  
Принята к опубликованию 25.11.2015.*

## ԴԻՍԿՐԵՏ ՄԻԱՏԻՊ ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՐԿԿԾԱՅԻՆ ՁԵՎԱՓՈԽՈՒԹՅԱՆ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ

**Օ.Ն. Գասպարյան, Օ.Հ. Օհանյան**

Դիտարկված են դիսկրետ միատիպ կարգավորման համակարգերի, այսինքն՝ առանձին կապուղիներում միևնույն փոխանցման ֆունկցիաներով և կոշտ փոխադարձ կապերով բազմաչափ համակարգերի հետազոտման հարցերը՝ երկգծային ձևափոխության հիման վրա ( $\varpi$ -տիրույթում): Ցույց է տրված, որ բնութագրիչ փոխանցման ֆունկցիաների մեթոդի կիրառումը հնարավորություն է տալիս կապուղիների կամայական  $N$  քանակով դիսկրետ միատիպ համակարգերի հետազոտումը հանգեցնել կոմպլեքս գործակիցներով  $N$  երևակայական միաչափ համակարգերի հետազոտմանը: Նշված են դիսկրետ միատիպ համակարգերի հաճախային բնութագրերի և արմատային հետազոտման հիմնական հատկությունները  $\varpi$ -տիրույթում: Բերված է եռաչափ միատիպ համակարգի վերլուծության օրինակ, և կատարված է դիսկրետ և համապատասխան անընդհատ համակարգերի արմատային հետազոտման համեմատություն:

**Առանցքային բաներ.** դիսկրետ բազմաչափ համակարգ, միատիպ համակարգ, ընդհատման պարբերություն,  $\varpi$ -ձևափոխություն, կայունություն, բնութագրիչ փոխանցման ֆունկցիա, հաճախային բնութագրեր, արմատային հետազոտման:

## INVESTIGATING THE DISCRETE UNIFORM CONTROL SYSTEMS BASED ON THE BILINEAR TRANSFORM

**O.N. Gasparyan, O.H. Ohanyan**

The issues on investigating, on the basis of bilinear transform (in the  $\varpi$ -domain), the discrete uniform control systems, that is multivariable systems with identical transfer functions of separate channels and rigid cross-connections are discussed. It is shown that the application of the characteristic transfer functions method allows to reduce the investigation of discrete uniform systems with an arbitrary number of channels  $N$  to the investigation of  $N$  fictitious one-dimensional systems with complex-valued coefficients. The main properties of frequency-domain characteristics and root loci of discrete uniform systems in the  $\varpi$ -domain are indicated. A numerical example of analysis of a three-dimensional uniform system, and the comparison of root loci of the discrete and the corresponding continuous systems are given.

**Keywords:** multivariable control system, uniform system, sampling period,  $\varpi$ -transform, stability, characteristic transfer function, frequency characteristics, root loci.

УДК 621.52+511.52

## К РЕШЕНИЮ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЧНЫХ УРАВНЕНИЙ ТИПА СТЕЙНА $A(t) \cdot X(t) \cdot B(t) - X(t) = C(t)$

С.О. Симонян

*Национальный политехнический университет Армении*

Предложены три метода решения однопараметрических неявных дискретных матричных уравнений типа Стейна: аналитический метод, который пригоден для задач с малыми размерами при простых элементах однопараметрических матриц; последовательный и параллельный численно-аналитические методы, основанные на дифференциальных преобразованиях Г.Е. Пухова и пригодные в общем случае при аналитических элементах этих матриц в центре аппроксимации. Получены условия однозначной разрешимости этих уравнений для всех трех методов. Рассмотрен модельный пример, для решения которого были использованы последовательный и параллельный численно-аналитические методы, при которых было получено точное маклореновское решение задачи.

**Ключевые слова:** однопараметрическое матричное уравнение типа Стейна, аналитический метод решения, дифференциальные преобразования, последовательный и параллельный численно-аналитические методы решения, условия однозначной разрешимости, модельный пример.

**Введение.** Числовые матричные уравнения Стейна достаточно часто встречаются в различных областях науки и техники [1,2]. Решению этих уравнений посвящено множество различных публикаций, в частности [3,4]. Однако в области методов решения однопараметрических матричных уравнений типа Стейна замечается очевидное отставание. Настоящая работа преследует цель некоторого заполнения этого пробела.

**Математический аппарат.** Рассмотрим однопараметрическое матричное уравнение типа Стейна

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

где  $A(t)$  - матрица порядка  $m$ ;  $B(t)$  - матрица порядка  $n$ ;  $C(t)$  - матрица с размерами  $m \times n$ ;  $X(t)$  - неизвестная матрица также с размерами  $m \times n$ , подлежащая определению:

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_{11}(t) & \dots & x_{1n}(t) \\ x_{21}(t) & \dots & x_{2n}(t) \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{m1}(t) & \dots & x_{mn}(t) \end{bmatrix} = (x_{ij}(t)), \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}. \quad (2)$$

**Аналитический метод решения.** Матричное уравнение (1) представим в следующем виде:

$$A(t)_{m \times m} \cdot X(t)_{m \times n} \cdot B(t)_{n \times n} - E_{m \times m} \cdot X(t) \cdot E_{n \times n} = C(t)_{m \times n}, \quad (3)$$

где  $E_{m \times m}$  и  $E_{n \times n}$  - единичные матрицы порядка  $m$  и  $n$  соответственно. Далее, с учетом результатов для числовых матриц, представленных в [1-4], уравнение (3) представим в виде

$$\begin{aligned} & [A(t) \otimes B^T(t)] \cdot \hat{X}(t) - [E_{m \times m} \otimes E_{n \times n}^T] \cdot \hat{X}(t) = \\ & = [A(t) \otimes B^T(t) - E_{mn \times mn}] \cdot \hat{X}(t) = D(t) \cdot \hat{X}(t) = \hat{C}(t), \end{aligned} \quad (4)$$

где символ  $\otimes$  - знак кронекерова произведения матриц, а гипервекторы

$$\hat{X}(t) = (x_{11}(t), \dots, x_{1n}(t) \vdots \dots \vdots x_{m1}(t), \dots, x_{mn}(t))^T, \quad (5)$$

$$\hat{C}(t) = (c_{11}(t), \dots, c_{1n}(t) \vdots \dots \vdots c_{m1}(t), \dots, c_{mn}(t))^T. \quad (6)$$

Следовательно, предполагая, что

$$\text{rang} D(t) = mn, \quad (7)$$

из (4) получим

$$\hat{X}(t) = D^{-1}(t) \cdot \hat{C}(t). \quad (8)$$

Далее, в соответствии с (8) легко получить решение в виде (2).

**Последовательный численно-аналитический метод решения.** Теперь допустим, что для матриц  $A(t)$ ,  $B(t)$ ,  $C(t)$  и  $X(t)$  с аналитическими элементами имеют место дифференциальные преобразования [5,6]:

$$A(K) = \frac{H^k}{K!} \cdot \frac{d^k A(t)}{dt^k} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \overline{\cdot} \quad A(t) = \chi_1(t, t_v, H, A(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (9)$$

$$B(K) = \frac{H^k}{K!} \cdot \frac{d^k B(t)}{dt^k} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \overline{\cdot} \quad B(t) = \chi_2(t, t_v, H, B(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (10)$$

$$C(K) = \frac{H^k}{K!} \cdot \frac{d^k C(t)}{dt^k} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \overline{\cdot} \quad C(t) = \chi_3(t, t_v, H, C(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (11)$$

$$X(K) = \frac{H^k}{K!} \cdot \frac{d^k X(t)}{dt^k} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \overline{\cdot} \quad X(t) = \chi_4(t, t_v, H, X(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (12)$$

где  $A(K)$ ,  $B(K)$ ,  $C(K)$  и  $X(K)$  - матричные дискреты матриц  $A(t)$ ,  $B(t)$ ,  $C(t)$  и  $X(t)$  соответственно с размерами  $m \times m$ ,  $n \times n$ ,  $m \times n$  и  $m \times n$ ;  $K = \overline{0, \infty}$  - целочисленный аргумент;  $H$  - масштабный коэффициент;  $t_v$  - центр аппроксимации; символ  $\overline{\cdot}$  - знак перехода из области оригиналов в область дифференциальных изображений и наоборот;  $\chi_1(\cdot) - \chi_4(\cdot)$  - некоторые аппроксимирующие функции, восстанавливающие оригиналы  $A(t)$ ,  $B(t)$ ,  $C(t)$  и  $X(t)$  соответственно. Тогда с учетом правил алгебры дифференциальных преобразований (см. [5], стр.72, формула

(4.7)) при переводе (4) из области оригиналов в область дифференциальных изображений получим:

при  $K=0$ :

$$\begin{aligned} \left[ A(0) \otimes B^T(0) - E_{m \times m} \otimes E_{n \times n} \right] \cdot \hat{X}(0) &= \left[ A(0) \otimes B^T(0) - E_{mn \times mn} \right] \cdot \hat{X}(0) = \\ &= D(0,0) \cdot \hat{X}(0) = \hat{C}(0), \end{aligned} \quad (13)$$

откуда, предполагая, что

$$\text{rang} D(0,0) = mn, \quad (14)$$

из (13) имеем

$$\hat{X}(0) = D^{-1}(0,0) \cdot \hat{C}(0), \quad (15)$$

где гипервекторы дискрет:

$$\begin{aligned} \hat{X}(0) &= (x_{11}(0), \dots, x_{1n}(0) : \dots : x_{m1}(0), \dots, x_{mn}(0))^T, \\ \hat{C}(0) &= (c_{11}(0), \dots, c_{1n}(0) : \dots : c_{m1}(0), \dots, c_{mn}(0))^T; \end{aligned}$$

при  $K=1$ :

$$\begin{aligned} \left[ A(1) \otimes B^T(0) + A(0) \otimes B^T(1) \right] \cdot \hat{X}(0) + \left[ A(0) \otimes B^T(0) - E_{mn \times mn} \right] \cdot \hat{X}(0) = \\ = D(1,0;0,1) \cdot \hat{X}(0) + D(0,0) \cdot \hat{X}(0) = \hat{C}(1), \end{aligned} \quad (16)$$

откуда

$$\hat{X}(1) = D^{-1}(0,0) \cdot \left[ \hat{C}(1) - D(1,0;0,1) \cdot \hat{X}(0) \right], \quad (17)$$

где гипервекторы дискрет:

$$\begin{aligned} \hat{X}(1) &= (x_{11}(1), \dots, x_{1n}(1) : \dots : x_{m1}(1), \dots, x_{mn}(1))^T, \\ \hat{C}(1) &= (c_{11}(1), \dots, c_{1n}(1) : \dots : c_{m1}(1), \dots, c_{mn}(1))^T; \end{aligned}$$

при  $K=2$ :

$$\begin{aligned} \left[ A(2) \otimes B^T(0) + A(1) \otimes B^T(1) + A(0) \otimes B^T(2) \right] \cdot \hat{X}(0) + \\ + \left[ A(1) \otimes B^T(0) + A(0) \otimes B^T(1) \right] \cdot \hat{X}(1) + \left[ A(0) \otimes B^T(0) - E_{mn \times mn} \right] \cdot \hat{X}(2) = \\ = D(2,0;1,1;0,2) \cdot \hat{X}(0) + D(1,0;0,1) \cdot \hat{X}(1) + D(0,0) \cdot \hat{X}(2) = \hat{C}(2), \end{aligned} \quad (18)$$

откуда

$$\hat{X}(2) = D^{-1}(0,0) \cdot \left[ \hat{C}(2) - D(2,0;1,1;0,2) \cdot \hat{X}(0) - D(1,0;0,1) \cdot \hat{X}(1) \right], \quad (19)$$

где гипервекторы дискрет:

$$\begin{aligned} \hat{X}(2) &= (x_{11}(2), \dots, x_{1n}(2) : \dots : x_{m1}(2), \dots, x_{mn}(2))^T, \\ \hat{C}(2) &= (c_{11}(2), \dots, c_{1n}(2) : \dots : c_{m1}(2), \dots, c_{mn}(2))^T; \end{aligned}$$

при  $K=K$ :

$$\begin{aligned}
& \left[ A(K) \otimes B^T(0) + A(K-1) \otimes B^T(1) + \dots + A(1) \otimes B^T(K-1) + A(0) \otimes B^T(K) \right] \cdot \hat{X}(0) + \\
& + \left[ A(K-1) \otimes B^T(0) + A(K-2) \otimes B^T(1) + \dots + A(1) \otimes B^T(K-2) + A(0) \otimes B^T(K-1) \right] \times \\
& \times \hat{X}(1) + \dots + \left[ A(1) \otimes B^T(0) + A(0) \otimes B^T(1) \right] \cdot \hat{X}(K-1) + \left[ A(0) \otimes B^T(0) - E_{mn \times mn} \right] \times \\
& \times \hat{X}(K) = D(K, 0; K-1, 1; \dots; 1, K-1, 0, K) \cdot \hat{X}(0) + D(K-1, 0; K-2, 1; \dots; 1, K-2, 0, K-1) \times \\
& \times \hat{X}(1) + \dots + D(1, 0; 0, 1) \cdot \hat{X}(K-1) + D(0, 0) \cdot \hat{X}(K) = \hat{C}(K),
\end{aligned} \quad (20)$$

откуда

$$\hat{X}(K) = D^{-1}(0, 0) \cdot \left[ \hat{C}(K) - \sum_{l=1}^K D(\ell, 0; \ell-1, 1; \dots; 1, \ell-1; 0, \ell) \cdot \hat{X}(K-\ell) \right], \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned}
D(\ell, 0; \ell-1, 1; \dots; 1, \ell-1; 0, \ell) &= \sum_{\ell=0}^K A(\ell) \otimes B^T(K-\ell) = \\
&= \sum_{\ell=0}^K A(K-\ell) \otimes B^T(\ell), \quad \forall \ell = \overline{1, K},
\end{aligned} \quad (22)$$

а гипервекторы дискрет:

$$\begin{aligned}
\hat{X}(K) &= (x_{11}(K), \dots, x_{1n}(K) : \dots : x_{m1}(K), \dots, x_{mn}(K))^T, \\
\hat{C}(K) &= (c_{11}(K), \dots, c_{1n}(K) : \dots : c_{m1}(K), \dots, c_{mn}(K))^T.
\end{aligned}$$

Таким образом, имея гипервекторы дискрет (15), (17), (19) и (21), их легко можно трансформировать в матричные дискреты:

$$X(K) = \begin{bmatrix} x_{11}(K) \dots x_{1n}(K) \\ x_{21}(K) \dots x_{2n}(K) \\ \dots \dots \dots \\ x_{m1}(K) \dots x_{mn}(K) \end{bmatrix}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad (23)$$

и в соответствии с (12) восстановить неизвестное решение задачи - оригинал  $X(t)$ .

**Параллельный численно-аналитический метод решения.** Объединение рекуррентных гипервекторных соотношений (15), (17), (19) и (21) приводит к следующему гиперматрично-гипервекторному представлению:

$$\begin{bmatrix} D(0,0) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ D(1,0;0,1) & D(0,0) & 0 & \dots & 0 \\ D(2,0;1,1;0,2) & D(1,0;0,1) & D(0,0) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D(K,0;K-1,1;\dots;1,K-1,0,K) & D(K-1,0;\dots;0,K-1) & \dots & \dots & D(0,0) \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} \hat{X}(0) \\ \hat{X}(1) \\ \hat{X}(2) \\ \vdots \\ \hat{X}(K) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{C}(0) \\ \hat{C}(1) \\ \hat{C}(2) \\ \vdots \\ \hat{C}(K) \end{pmatrix} \quad (24)$$

или

$$D(\bullet) \cdot \hat{X}(\bullet) = \hat{C}(\bullet), \quad (25)$$

откуда с учетом условия (14), а следовательно, и условия

$$\text{rang} D(\bullet) = (K+1) \cdot m \cdot n \quad (26)$$

из (25) получим

$$\hat{X}(\bullet) = D^{-1}(\bullet) \cdot \hat{C}(\bullet) \quad (27)$$

или

$$\begin{pmatrix} \hat{X}(0) \\ \hat{X}(1) \\ \hat{X}(2) \\ \vdots \\ \hat{X}(K) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} D_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ D_1 & D_0 & 0 & \dots & 0 \\ D_2 & D_1 & D_0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \vdots \\ D_K & D_{K-1} & D_{K-2} & \dots & D_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{C}(0) \\ \hat{C}(1) \\ \hat{C}(2) \\ \vdots \\ \hat{C}(K) \end{pmatrix}, \quad (28)$$

где с учетом приведенных в [6] результатов блоки - гиперматрицы

$$\left\{ \begin{array}{l} D_0 = D^{-1}(0,0) = D^{-1}(0,0) \cdot E = D^{-1}(0,0) \cdot \bar{D}_0, \\ D_1 = -D^{-1}(0,0) \cdot [D(1,0;0,1) \cdot D^{-1}(0,0)] = D^{-1}(0,0) \cdot \bar{D}_1, \\ D_2 = -D^{-1}(0,0) \cdot [D(2,0;1,1;0,2) \cdot D^{-1}(0,0) - (D(1,0;0,1) \cdot D^{-1}(0,0))^2] = \\ \quad = D^{-1}(0,0) \cdot \bar{D}_2, \\ \dots \\ D_K = -D^{-1}(0,0) \cdot \sum_{r=1}^K D(r,0;r-1,1;\dots;1,r-1;0,r) \cdot D_{K-r} = D^{-1}(0,0) \cdot \bar{D}_K. \end{array} \right. \quad (29)$$

И, наконец, имея гипервектор (27) или (28), в соответствии с обратным дифференциальным преобразованием (12) можно восстановить решение  $X(t)$ .

**Модельный пример.** Рассмотрим однопараметрическое матричное уравнение типа Стейна:

$$\begin{bmatrix} 1 & jt & (1+j) \\ t & 0 & 1 \\ j & -t & j \end{bmatrix} \cdot X(t) \cdot \begin{bmatrix} jt & -1 \\ -t & 0 \end{bmatrix} - X(t) = \begin{bmatrix} jt^2 - 2jt - t^3 & (-j - t - jt) \\ (-t^3 + jt^3 + 1) & (-j - 2t - jt^2) \\ (jt^2 - t^2) & (-jt + jt^2) \end{bmatrix}$$

Очевидно, при  $t_v = 0, H = 1$  имеем следующие матричные дискреты:

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

$$B(0) = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B(1) = \begin{bmatrix} j & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}; \quad B(K) = [0], \quad K \geq 2;$$

$$C(0) = \begin{bmatrix} 0 & -j \\ 1 & -j \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad C(1) = \begin{bmatrix} -2j & (-1-j) \\ 0 & -2 \\ 0 & -j \end{bmatrix}; \quad C(2) = \begin{bmatrix} j & 0 \\ 0 & -j \\ (j-1) & j \end{bmatrix}; \quad C(3) = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ (-1+j) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$C(K) = [0], \quad K \geq 4;$$

а) Применение последовательного численно-аналитического метода решения.

Имеем:

при  $K=0$ :

$$D(0,0) = A(0) \otimes_{3 \times 3} B^T(0) - E_{3 \times 3} \otimes_{2 \times 2} E_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & (-1-j) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ -j & 0 & -1 & 0 \\ -j & 0 & -j & -1 \end{bmatrix},$$

$$D^{-1}(0,0) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & (1+j) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ j & 0 & j & -1 \end{bmatrix},$$

$$\hat{X}(0) = D^{-1}(0,0) \cdot \hat{C}(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{j}{-1} \\ \frac{j}{0} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad X(0) = \begin{bmatrix} 0 & j \\ -1 & j \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

при  $K=1$ :

$$D(1,0;0,1) = A(1) \otimes B^T(0) + A(0) \otimes B^T(1) = \begin{bmatrix} j & -1 & 0 & 0 & (-1+j) & (-1-j) \\ 0 & 0 & -j & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & \mathbf{0} & & j & -1 \\ \hline -1 & 0 & & & 0 & 0 \\ \hline -1 & -j & 0 & 0 & -1 & -j \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\hat{X}(1) = D^{-1}(0,0) \cdot [\hat{C}(1) - D(1,0;0,1) \cdot \hat{X}(0)] =$$

$$= D^{-1}(0,0) \cdot \left[ \begin{pmatrix} -2j \\ (-1-j) \\ 0 \\ -2 \\ 0 \\ -j \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -j \\ j \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} j \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad X(1) = \begin{bmatrix} j & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix};$$

npu K=2:

$$D(2,0;1,1;0,2) = A(2) \otimes B^T(0) + A(1) \otimes B^T(1) + A(0) \otimes B^T(2)$$

$$(2) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -1 & -j & \mathbf{0} \\ & 0 & 0 & \\ \hline j & -1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & & \\ \hline \mathbf{0} & -j & 1 & \mathbf{0} \\ & 0 & 0 & \end{bmatrix},$$

$$\hat{X}(2) = D^{-1}(0,0) \cdot [\hat{C}(2) - D(2,0;1,1;0,2) \cdot \hat{X}(0) - D(1,0;0,1) \cdot \hat{X}(1)] =$$

$$= D^{-1}(0,0) \cdot \left[ \begin{pmatrix} j \\ 0 \\ 0 \\ -j \\ (-1+j) \\ j \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ -j \\ 0 \\ 2j \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} (-2+j) \\ 0 \\ j \\ -j \\ (-1-j) \\ 0 \end{pmatrix} \right] = D^{-1}(0,0) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -j \end{pmatrix},$$

$$X(2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -j \end{bmatrix};$$

npu K=3:

$$D(3,0;2,1;1,2;0,3) = A(3) \otimes B^T(0) + A(2) \otimes B^T(1) + A(1) \otimes B^T(2) + A(0) \otimes B^T(3) = [0],$$

$$\hat{X}(3) = D^{-1}(0,0) \cdot [\hat{C}(3) - D(3,0;2,1;1,2;0,3) \cdot \hat{X}(0) - D(2,0;1,1;0,2) \cdot \hat{X}(1) - D(1,0;0,1) \cdot \hat{X}(2)] = D^{-1}(0,0) \cdot \left[ \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -j \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} (-1+j) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$X(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Нетрудно убедиться, что такая же картина имеет место и при  $K \geq 4$ , т.е.

$$X(K) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \forall K \geq 4.$$

Следовательно, маклореновское решение задачи выглядит так:

$$X(t) = \begin{bmatrix} 0 & j \\ -1 & j \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot t + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -j \end{bmatrix} \cdot t^2 = \begin{bmatrix} jt & j \\ -1 & (j+t) \\ t & -jt^2 \end{bmatrix},$$

в точности которой также нетрудно убедиться.

б) Применение параллельного численно-аналитического метода решения.

С учетом (24) при  $D(0,0)$ ,  $D(1,0;0,1)$ ,  $D(2,0;1,1;0,2)$  и  $D(3,0;2,1;1,2;0,3)$  в соответствии с (29) имеем

$$D_0 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & (-1-j) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -j & 0 & 0 & -j-1 \end{bmatrix},$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} -2j & 1 & 0 & 0 & (-1-3j) & (1+j) \\ (-3+j) & -j & j & 0 & (-5+j) & -2j \\ -j & 0 & 0 & -2j & 1 & 1 \\ (-1+j) & -j & 0 & 0 & (-3+j) & -j \\ (2-j) & j & 0 & 0 & (3-j) & j \\ (-3-2j) & (1-j) & -1 & 0 & (-4-4j) & (2-j) \end{bmatrix},$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} (5+7j) & (-3+j) & 2 & j & (6+11j) & (-5+j) \\ (6-13j) & (4+4j) & (-1-3j) & 1 & (11-18j) & (5+6j) \\ (3+3j) & (-1+j) & 1 & 0 & (4+6j) & (-3+j) \\ (3-7j) & (2+2j) & (-1-2j) & 1 & (5-10j) & (3+3j) \\ (-3+9j) & (-3-2j) & (1+2j) & -1 & (-6+13j) & (-4-4j) \\ (16-3j) & (-1+6j) & (2-3j) & (1+j) & (24-2j) & (-2+9j) \end{bmatrix},$$

$$D_3 = \begin{bmatrix} (-37-5j) & (6-13j) & (-7+5j) & (-1-3j) & (-54-12j) & (11-18j) \\ (23+59j) & (-24+j) & (13+6j) & (-4+4j) & (27+91j) & (-36-j) \\ (-20-j) & (3-7j) & (-4+3j) & (-1-2j) & (-29-4j) & (5-10j) \\ (15+30j) & (-13+2j) & (7+3j) & (-2+2j) & (19+47j) & (-19+j) \\ (-20-37j) & (16-3j) & (-9-3j) & (2-3j) & (-25-58j) & (24-2j) \\ (-39+60j) & (-17-21j) & (3+16j) & (-6-j) & (-66+85j) & (-23-34j) \end{bmatrix},$$

а в соответствии с (28) с учетом  $\hat{C}(0), \hat{C}(1), \hat{C}(2)$  и  $\hat{C}(3)$  при последних гиперматрицах  $D_0, D_1, D_2$  и  $D_3$  получаем точные значения матричных дискрет  $X(0), X(1), X(2)$  и  $X(3)$ , приведенных выше при применении последовательного численно-аналитического метода решения. Естественно, при этих матричных дискретах будет получено и точное решение  $X(t)$ .

**Замечание 1.** Известно [3, стр.92, формула (12.10)], что числовое матричное уравнение Стейна с матрицами  $A$  и  $B$  однозначно разрешимо для ее любой правой части  $C$ , если

$$\lambda_i(A) \cdot \lambda_j(B) \neq 1, \quad \forall i, j, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (30)$$

где  $\lambda_i(A)$  и  $\lambda_j(B)$  - собственные числа матриц  $A(t)$  и  $B(t)$  соответственно.

Эти условия применительно к функциональному уравнению (1) будут выглядеть так:

$$\lambda_i(A(t)) \cdot \lambda_j(B(t)) \neq 1, \quad \forall i, j, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (31)$$

где  $\lambda_i(A(t))$  и  $\lambda_j(B(t))$  - собственные функции матриц  $A(t)$  и  $B(t)$  соответственно.

С другой стороны, имея в виду числовые матрично-векторные уравнения (13), (16), (18) и (20), можно заключить, что условием однозначной разрешимости этих рекуррентных матрично-векторных уравнений является невырожденность матрицы  $D(0,0)$ , т.е. существование матрицы  $D^{-1}(0,0)$ . Следовательно, при решении конкретных задач последовательным численно-аналитическим методом вместо использования условий (30), проверка которых обычно связана с большими вычислительными трудностями из-за необходимости определения собственных чисел  $\lambda_i(A)$  и  $\lambda_j(B)$ ,  $\forall i, j, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$ , можно воспользоваться одним единственным условием –

условием проверки невырожденности матрицы  $D(0,0)$ . Это условие, естественно, может быть использовано и для проверки условия однозначной разрешимости задачи при реализации параллельной схемы (28), ибо из условия (14) немедленно следует и выполнение условия (26). Что же касается проверки однозначной разрешимости однопараметрического матричного уравнения (1), то при этом вместо проверки трудно реализуемых условий (31), обычно связанных с вычислительными затруднениями из-за немногочисленности соответствующих вычислительных методов по определению собственных функций  $\lambda_i(A(t))$  и  $\lambda_j(B(t)), \forall i, j, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$ , функциональных матриц  $A(t)$  и  $B(t)$  соответственно (см., в частности, [6]), можно воспользоваться аналогичным единственным однопараметрическим условием (7), к сожалению, также трудно поддающимся проверке.

**Замечание 2.** При невыполнении условия (31) фактически нарушается условие однозначной разрешимости исходной задачи. При этом, естественно, нарушаются и условие (7) при аналитическом методе, условие (14) - при последовательном численно-аналитическом методе, а также условие (26) - при параллельном численно-аналитическом методе. Естественно, имеет место и обратное утверждение, т.е. из нарушения одного из условий (7), (14) или (26) немедленно следует и нарушение условия (31) об однозначной разрешимости исходной задачи.

**Заключение.** Таким образом, решение однопараметрических уравнений типа Стейна  $A(t) \cdot X(t) \cdot B(t) + X(t) = C(t)$  с аналитическими элементами на основе использования прямых дифференциальных преобразований сводится к рекуррентным численным процедурам при разработанном последовательном численно-аналитическом методе и к поточной численной процедуре при разработанном параллельном численно-аналитическом методе. В обоих случаях восстановление оригиналов-решений осуществляется на основе использования обратных дифференциальных преобразований, что не представляет особых вычислительных затруднений. Что касается аналитического метода, то он представляет, скорее всего, теоретический интерес ввиду его достаточно сильной ограниченности в практическом плане.

И, наконец, заметим, что предложенные численно-аналитические методы могут быть эффективно реализованы средствами современных информационных технологий [7,8].

#### Литература

1. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. - М.: Наука. 2010. - 560 с.
2. Ланкастер П. Теория матриц. - М.: Наука, 1978. - 280 с.
3. Икрамов Х.Д. Численное решение матричных уравнений. - М.: Наука, 1984. - 190 с.
4. Мамонов С.С. Решение матричных уравнений // Вестник Ряз. гос. ун.-та. им. С.А. Есенина. - Рязань, 2009.- Вып. 21, №1. - С. 115 - 136.

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. - Ереван: Изд-во ГИУА “Чартарагет”, 2010.- 361с.
7. Метьюз Дж. Г., Финк К.Д. Численные методы. Использование MATLAB.- М.: СПб., Киев, 2001.- 713 с.
8. **Straustrup В.** The C<sup>++</sup> Programming Language. 4<sup>th</sup> edition.- Boston: Addison-Wesley Professional, 2013. -1368 p.

*Поступила в редакцию 10.06.2015.  
Принята к опубликованию 25.11.2015.*

**ՄՏԵՅՆԻ ՏԻՊԻ  $A(t) \cdot X(t) \cdot B(t) - X(t) = C(t)$  ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ  
ՄԱՏՐԻՑԱՅԻՆ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ**

**Ս.Հ. Սիմոնյան**

Առաջարկվել են Ստեյնի տիպի միապարամետրական մատրիցային հավասարումների լուծման երեք եղանակներ՝ անալիտիկ եղանակը, որը հարմար է փոքր չափերով և միապարամետրական մատրիցների հասարակ տարրերով խնդիրների լուծման համար, հաջորդական և զուգահեռ թվա-անալիտիկ եղանակները, որոնք հիմնված են Գ.Ե. Պուխովի դիֆերենցիալ ձևափոխությունների վրա և հարմար են ընդհանուր դեպքում և այդ մատրիցների մոտարկման կենտրոններում առկա անալիտիկ տարրերի դեպքում: Ստացվել են այդ հավասարումների միարժեքորեն լուծելիության պայմանները բոլոր երեք մեթոդների դեպքում: Դիտարկվել է մոդելային օրինակ, որի լուծման նպատակով օգտագործվել են հաջորդական և զուգահեռ թվա-անալիտիկ եղանակները, որոնց դեպքում ստացվել է խնդրի ճշգրիտ մակլորենյան լուծումը:

**Առանցքային բաներ.** Ստեյնի տիպի միապարամետրական մատրիցային հավասարում, լուծման անալիտիկ եղանակ, դիֆերենցիալ ձևափոխություններ, հաջորդական և զուգահեռ թվա-անալիտիկ լուծման եղանակներ, միարժեքորեն լուծելիության պայմաններ, մոդելային օրինակ:

**THE SOLUTION OF ONE-PARAMETRIC STEIN-TYPE  
MATRIX EQUATIONS  $A(t) \cdot X(t) \cdot B(t) - X(t) = C(t)$**

**S.H. Simonyan**

Three methods for solving one-parametric implicit discrete matrix Stein-type equations are proposed: analytical method suitable for the problems with small dimensions at simple elements of one-parametric matrices; successive, and parallel numerical-analytical methods based on the Pukhov's differential transformations and suitable in the general case at analytical elements of these matrices in the approximation centre. The conditions of unambiguous solvability of these equations for all three methods are obtained. A model example is considered for whose solution, successive and parallel numerical-analytical methods at which an accurate Maccloren solution of the problem is obtained.

**Keywords:** one parametric implicit discrete matrix Stein-type equation, analytical method of solution, differential transformations, successive and parallel numerical-analytical methods of solution, conditions of unambiguous solvability, model example.

УДК 681.586.72

## ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНОГО ПАРАМЕТРА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Б.М. Мамиконян, Д.С. Никогосян, Л.С. Абрамян

*Национальный политехнический университет Армении, Гюмрийский филиал*

Описано измерительное устройство с дифференциальным емкостным преобразователем (ЕП). В измерительной цепи последовательно с ЕП включен через электронный переключатель образцовый резистор. Образованный этим соединением делитель напряжения питается синусоидальным током высокой частоты. Выходной величиной измерительной цепи является угол сдвига фаз между общим напряжением делителя напряжения и напряжением ЕП. Этот угол преобразуется в длительность однополярных прямоугольных импульсов, которая измеряется методом дискретного счета. Управление процессом измерения и обработка результатов измерений осуществляются программируемым микроконтроллером.

**Ключевые слова:** емкостный преобразователь, информативный параметр, широтно-импульсное преобразование, длительность импульсов, метод дискретного счета.

**Введение.** Емкостные преобразователи благодаря простоте конструкции и низкой стоимости применяются для измерения большого количества разнообразных технологических величин, таких как перемещение, приближение, влажность, ускорение, уровень жидкости, концентрация газов и др. В последние годы с появлением МЕМС-технологии и устройств [1], объединяющих в себе микроэлектронные и микромеханические компоненты, применение емкостных чувствительных элементов сильно возросло. При этом чувствительные элементы реализуются в дифференциальном исполнении.

**Методы исследования.** Для измерения информативного параметра ЕП обычно применяется его преобразование в потенциально-токовые сигналы, что без дополнительных корректирующих цепей не может обеспечить инвариантное измерение, поскольку эти сигналы подвержены влиянию изменения напряжения питания измерительной цепи, напряжений смещения и дрейфа операционных усилителей, внутренних шумов и внешних помех. С целью исключения влияния

перечисленных мешающих факторов в рассматриваемом в данной работе емкостном измерительном устройстве применяется широтно-импульсное преобразование информативного параметра дифференциального ЭП.

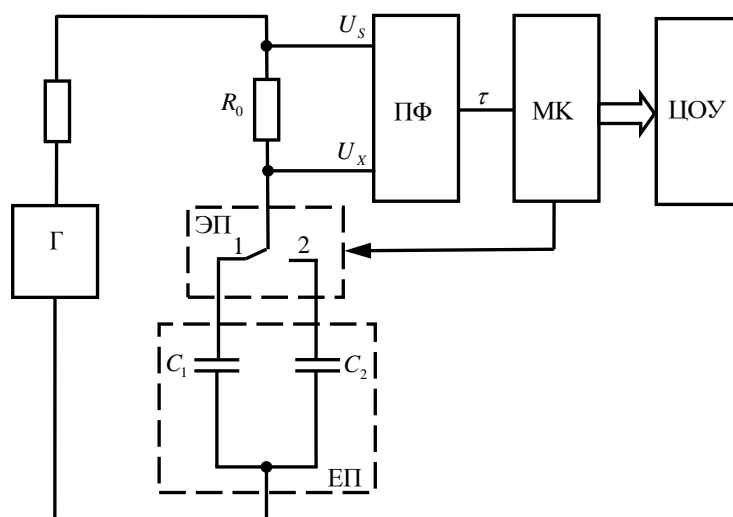


Рис. 1. Блок-схема емкостного измерительного устройства: Г- генератор синусоидального тока; ЭП- электронный переключатель; ЕП- дифференциальный емкостный преобразователь; ПФ- преобразователь фазы; МК- программируемый микроконтроллер; ЦОУ- цифровое отсчетное устройство

В измерительной цепи устройства (рис. 1) последовательно с ЕП включен через электронный переключатель образцовый резистор  $R_0$ , и образованный этим соединением делитель напряжения питается синусоидальным током генератора (при необходимости, через токоограничивающий элемент). Выходной величиной измерительной цепи является угол сдвига фаз  $\varphi$  между напряжениями  $\dot{U}_s$  (общее напряжение делителя напряжения) и  $\dot{U}_x$  (напряжение ЭП). В общем случае для угла  $\varphi$  можем написать

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\operatorname{Im}(\dot{U}_s / \dot{U}_x)}{\operatorname{Re}(\dot{U}_s / \dot{U}_x)} = \frac{\operatorname{Im}[\dot{I}(R_0 - jX_c) / \dot{I}(-jX_c)]}{\operatorname{Re}[\dot{I}(R_0 - jX_c) / \dot{I}(-jX_c)]} = \frac{R_0}{X_c} = \omega R_0 C.$$

Для положений 1 и 2 ЭП получим соответственно:  $\operatorname{tg} \varphi_1 = \omega R_0 C_1$  и  $\operatorname{tg} \varphi_2 = \omega R_0 C_2$ , где  $C_1 = C_0 + \Delta C$ ,  $C_2 = C_0 - \Delta C$ , а  $C_0$  - начальное значение этих

параметров, которое постоянно и известно (указывается в паспортных данных ЕП). Если для дифференциального ЕП информативным параметром является приращение  $\Delta C$  емкостей, то можем написать  $tg \varphi_1 - tg \varphi_2 = \omega R_0 (C_1 - C_2) = 2\omega R_0 \Delta C$ , следовательно,

$$\Delta C = \frac{1}{2\omega R_0 (tg \varphi_1 - tg \varphi_2)}. \quad (1)$$

Видно, что на результат преобразования информативного параметра ЕП не влияет напряжение генератора. Измерить надо только значения  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  угла  $\varphi$ , что осуществляется одними и теми же аппаратными средствами.

Широкое использование дифференциальных ЕП обусловлено стабильностью их параметров в широком диапазоне изменения температуры ЕП. Наличие в одном корпусе двух идентичных половин датчика позволяет осуществить относительное преобразование рабочей емкости, однако преимущества, заложенные в дифференциальной конструкции, проявляются в полной мере только тогда, когда информативным параметром является относительное приращение емкости  $\delta(C) = \Delta C / C_0$  [2]. Такое преобразование автоматически обеспечивает логометрическую коррекцию погрешности ЕП, позволяющую существенно снизить его температурную погрешность и исключить влияние диэлектрической проницаемости межэлектродной среды на результат преобразования. В рассматриваемом устройстве функция преобразования этого информативного параметра получается в следующем виде:

$$\delta(C) = \frac{tg \varphi_1 - tg \varphi_2}{tg \varphi_1 + tg \varphi_2}. \quad (2)$$

Как видно из (2), в этом случае на результат преобразования не влияют также частота генератора и значение сопротивления резистора  $R_0$  (следовательно, и переходные сопротивления контактов ЭП).

**Результаты исследования.** Для измерения угла  $\varphi$  использован преобразователь фазы (ПФ) (рис. 1), в котором угол  $\varphi$  преобразуется в длительность  $\tau$  прямоугольных однополярных импульсов. ПФ содержит быстродействующий двоярный компаратор и логический элемент “Исключающее ИЛИ” [3]. На входах компаратора действуют синусоидальные напряжения  $u_S$  и  $u_X$ , на выходе получают меандры, сдвинутые по фазе на угол  $\varphi$ , которые поступают на вход элемента “Исключающее ИЛИ”, на выходе которого получается напряжение  $u_\tau$  в виде последовательности однополярных прямо-

угольных импульсов, длительность  $\tau$  которых прямо пропорциональна углу  $\varphi$  (рис. 2).

Эти импульсы поступают на вход программируемого микроконтроллера (МК), где измеряется  $\tau$ , вычисляется  $\varphi$  по очевидной формуле  $\varphi = \frac{\tau}{T} \cdot 360^\circ$  и по формуле (2) определяется  $\Delta C/C_0$ , по значению которой на цифровом индикаторе отображается текущее значение преобразуемой емкостным преобразователем физической величины; МК управляет также периодическим переключением аналогового переключателя ЭП. Наличие МК упрощает также сопряжение устройства с компьютером, т.к. МК можно по интерфейсу RS-232 соединить с компьютером через СОМ-порт и непрерывно передавать результаты измерений в компьютер.

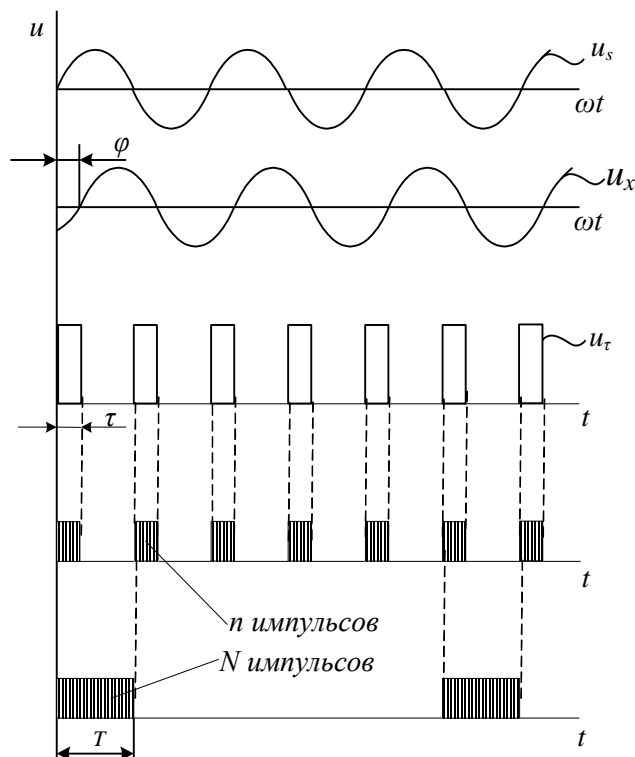


Рис. 2. К измерению угла фазового сдвига методом дискретного счета

В МК временные интервалы  $\tau$  и  $T$  измеряются методом дискретного счета путем заполнения их импульсами образцовой частоты  $f_0$  тактового генератора МК с использованием его интегрированного таймер-счетчика. Показание счетчика будет

$$\varphi = \frac{\tau}{T} \cdot 360^\circ = \frac{nT_0}{NT_0} \cdot 360^\circ = \frac{n}{N} \cdot 360^\circ .$$

С целью повышения точности измерения производится усреднение результата измерения, т.е. импульсы считаются за  $m$  периодов исследуемого сигнала, при этом длительность одного цикла измерения выбирается из условия

$$T_{izm} = mT \gg T. \quad (3)$$

При выполнении этого условия на счетчик пройдут  $m$  групп счетных импульсов, поэтому общее количество счетных импульсов, попавших на вход счетчика в промежутки времени  $\tau$ , будет

$$M = m \cdot n = \frac{T_{izm}}{T} \cdot n = m \cdot \frac{\tau}{T_0} = \frac{m\varphi T}{T_0 \cdot 360^\circ} . \quad (4)$$

Очевидно, что в этом случае показания счетчика будут пропорциональны среднему значению угла сдвига фаз за  $m$  периодов исследуемого сигнала:

$$\varphi_c = \frac{T_0}{T} \cdot 360^\circ \cdot \frac{M}{m} .$$

**Выводы.** Погрешность измерения угла  $\varphi_c$  определяется погрешностью определения количества импульсов  $M$ . Эта погрешность определяется случайной погрешностью дискретности, т.е. возможностью потери в числе  $M$  одного счетного импульса в группе и возможностью потери части группы в интервале усреднения. Погрешность определения  $M$  по формуле (4) тем меньше, чем больше число импульсов  $n$  в каждой пачке и чем лучше выполняется условие (3). Относительная погрешность измерения  $\varphi_c$  оценивается по формуле  $\delta = (T/T_{izm}) \cdot 100\%$ . Ее требуемое значение может быть обеспечено соответствующим выбором тактовой частоты генератора МК и длительности цикла измерения.

#### Литература

1. Нанотехнологии. Азбука для всех / Под ред. Ю.Д. Третьякова. - М.: Физматлит, 2008. - 368 с.
2. Арбузов В.П., Ларкин С.Е., Мишина М.А. Преобразователь информативного параметра емкостного датчика в напряжение // Датчики и системы. – 2011. - №11. – С. 11-15.

3. **Мамиконян Б.М., Мамиконян Х.Б.** Измерительные цепи индуктивных и емкостных первичных преобразователей с фазовыми выходными сигналами // Приборы. – 2015. - №7. – С. 11-16.

*Поступила в редакцию 12.10.2015.*

*Принята к опубликованию 25.11.2015.*

### **ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ՈՒՆԱԿԱՅԻՆ ԿԵՐՊԱՓՈՒՏԻՉԻ ԻՆՖՈՐՄԱՏԻՎ ՊԱՐԱՄԵՏՐԻ ԼԱՅՆԱԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ԿԵՐՊԱՓՈՒՍՄԸ**

**Բ.Մ. Մամիկոնյան, Դ.Ս. Նիկողոսյան, Լ.Ս. Աբրահամյան**

Նկարագրված է դիֆերենցիալ ունակային կերպափոխիչով (ՈԻԿ) չափման սարք: Չափողական շղթայում ՈԻԿ-ին հաջորդաբար միացված է էլեկտրոնային փոխանցատիչի միջոցով նմուշային ռեզիստոր: Այդ միացումով կազմված լարման բաժանարարը սնվում է բարձր հաճախության սինուսոիդային հոսանքով: Չափողական շղթայի ելքային մեծությունը լարման բաժանարարի ընդհանուր լարման և ՈԻԿ-ի լարման միջև փոփոխյալ շեղման անկյունն է: Այդ անկյունը կերպափոխվում է միաբևեռ ուղղանկյունաձև իմպուլսների տևողության, որը չափվում է դիսկրետ հաշվանքի մեթոդով: Չափման գործընթացի կառավարումը և չափումների արդյունքների մշակումն իրականացվում է ծրագրավորվող միկրոկոնտրոլերով:

**Առանցքային բառեր.** ունակային կերպափոխիչ, ինֆորմատիվ պարամետր, լայնաիմպուլսային կերպափոխում, իմպուլսների տևողություն, դիսկրետ հաշվանքի մեթոդ:

### **THE PULSE-WIDTH CONVERSION OF THE INFORMATIVE PARAMETER OF DIFFERENTIAL CAPACITIVE TRANSDUCER**

**B.M. Mamikonyan, D.S. Nikoghosyan, L.S. Abrahamyan**

A measuring device with differential capacitive transducer (CT) is described. In the measuring circuit, the sample resistor is connected in series with the CT via an electronic switch. The voltage divider, generated by this connection, is fed by high-frequency sinusoidal current. The phase angle between the total voltage of voltage divider and the voltage of CT is the output value of measuring circuit. This angle is converted to the duration of unipolar rectangular pulses, which is measured by the discrete count method. The measurement process control, and the processing of measurement results are carried out by programmable microcontroller.

**Keywords:** capacitive transducer, informative parameter, pulse-width conversion, pulse duration, discrete count method.

УДК 616.728.3-001

## АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

О.А. Петросян, Л.Э. Хачикян

Национальный политехнический университет Армении

Предложена методика построения модели биоткани с учетом влияния емкости и сопротивления глубоких слоев ткани, которая обеспечивает достоверность модели. Предлагается при моделировании принимать во внимание частотную зависимость емкостей эквивалентных схем биоткани. Проведен анализ моделей, рассматривающих биологическую ткань в виде линейной системы. Представлены результаты моделирования (нарастание тока через биоткань), выполненного с помощью программы HSPICE с технологическими нормами SAED EDK 28 нм, которые могут быть рекомендованы для оценки функционального состояния организма.

**Ключевые слова:** электрическая модель, биологическая система, биоткань, эквивалентная схема, моделирование.

**Введение.** При диагностике и восстановительном лечении важное значение имеет электростимуляция биотканей. Результатом воздействия электрического тока (или поля) на биоткань является изменение поляризации клеточных мембран при движении ионов в цитоплазме и межклеточном пространстве, а также соответствующего заряда вплоть до их возбуждения. На поверхности клеточной мембраны возникают области гиперполяризации, где потенциал увеличен, и деполяризации, что приводит клетку в возбуждение (рис. 1) [1].

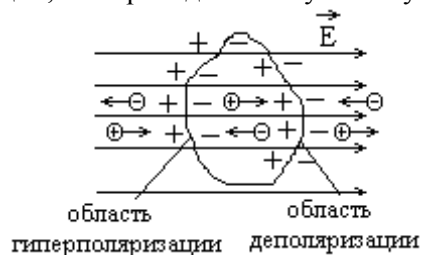


Рис. 1. Действие электрического поля напряженностью  $E$  на движение ионов в клетках и поляризацию клеточных мембран

Известно, что электростимуляция характеризуется законами Вейса-Лапика (зависимость порогового значения тока от длительности прямоугольного электрического импульса) и Дюбуа-Реймона (возбудимость биоткани увеличи-

вадается с ростом скорости нарастания силы тока) [1,2]. Клетки жировой ткани и внеклеточные воды проявляют электрическое сопротивление, а клетки клеточной мембраны - емкостное сопротивление. Клеточная мембрана нейтральна по отношению к границе раздела внутренней и наружной среды и активна в процессе обмена различных видов химических веществ. Пассивная часть клеточной мембраны (~ 7 нм) обеспечивает проходимость липидов и молекул воды через мембрану, но она абсолютно недоступна для ионов, а ее внутренняя электрическая проводимость очень низка и поэтому может рассматриваться как диэлектрик. Структура, сформированная из подобной пленки и внеклеточных слоев мембраны, ведет себя как конденсатор (~1 мкФ/см<sup>2</sup>) [1]. По этой причине при биофизических исследованиях биоткань рассматривается в виде сопротивления (включая сопротивление дермы и подкожного слоя) R<sub>дп</sub> в сочетании с параллельной R<sub>э</sub>C<sub>э</sub> - цепью, где R<sub>э</sub> и C<sub>э</sub> - сопротивление и емкость эпидермиса соответственно. В результате рассматривается комплексное сопротивление, активная и реактивная составляющие которого несут информацию о состоянии биоткани, позволяя при анализе этих параметров оценивать норму и патологию на разных частотах (рис. 2).

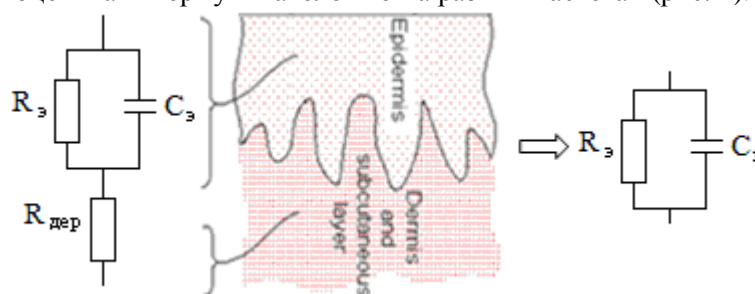


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема эпидермиса и дермы

**Методы исследования.** Модель системы биоткани, преобразующая входные сигналы в выходные, описывается выражением [2-5]

$$\begin{cases} Q' = A Q + i(t), \\ u(t) = C Q + d_0 i(t), \end{cases} \quad Q = \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} a_1 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & a_i & \dots & 0 \\ a_i & \dots & a_n \end{bmatrix}, \quad C = [c_1 \dots c_n], \quad q_i = \frac{I(s)}{s - a_i}, \quad (1)$$

где Q - передаточная функция биотканной системы с размерностью электрического заряда; i(t) - входной сигнал стимула; u(t) - падение напряжения на электродах;  $d_0 = \lim_{s \rightarrow \infty} z(s)$ ; a<sub>i</sub>, c<sub>i</sub> - постоянные коэффициенты.

Модель связывает входной ток, протекающий по исследуемому объекту, и регистрируемое на нем выходное напряжение через переменные состояния Q с

размерностью электрического заряда. Коэффициент  $d_0$  представляет частотно-независимую составляющую импеданса с размерностью сопротивления, которая отражает свойства тканей, имеющих активное сопротивление. Каждое из дифференциальных уравнений (1), содержащих переменные состояния  $q_i$ , описывает инерционный процесс формирования напряжения при изменении тока. Таким образом, переменная состояния характеризует импедансные свойства структур биотканей, обладающих резистивно-емкостным сопротивлением. Уравнения, имеющие аperiodические решения, описывают прохождение электрического тока через параллельное соединение активного и емкостного сопротивлений. Схема моделирования, отвечающая уравнению (1), имеет вид электрических эквивалентных схем, представленных на рис. 2. Параметры модели  $R$ ,  $C$  могут быть определены из значений коэффициентов  $d_0$ ,  $a_i$ ,  $c_i$ . Имея значения электрофизических параметров верхних слоев биоткани, можно определить частотные зависимости биоимпеданса и конкретное влияние изменений в отдельных слоях на эти зависимости. В этом случае параметры емкостей эквивалентных схем становятся частотно-зависимыми, а изменения емкости конденсатора модели от частоты имеют вид [1,3]

$$C_f = \frac{C_0}{\sqrt{Kf}}.$$

В соответствии с этими изменениями модифицированная электрофизическая модель верхних слоев биоткани приведена на рис. 3.

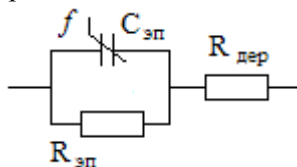


Рис. 3. Модифицированная электрофизическая модель эпидермиса

На основе характеристик эпидермиса, дермы и других слоев (роговой, блестящий, зернистый и т.д.), имеющих пониженное сопротивление, а также с учетом того, что количество переменных состояний модели (1) определяет число параллельно соединенных элементов  $R$  и  $C$  последовательной цепи, приведенных на рис. 4, предложены модифицированные эквивалентные схемы биоткани при условии, что  $R_1 > R_i > R_n$ .

**Модель 1.** Модель (рис. 1) состоит из конденсатора  $C_2$  (емкость кожи), параллельно соединенного с сопротивлением  $R_0$  (техническая модель рогового слоя), представляющего верхний слой эпидермиса. Сопротивление  $R_1$ , как сопротивление более глубоких тканей эпидермиса, имеет последовательное соединение с цепью  $C_2$ - $R_0$ . Диапазон значений для  $R_0$  может колебаться от 1000

до 5000 кОм, в то время как значения для  $R_1$  находятся в пределах от 0,1 до 1,0 кОм.

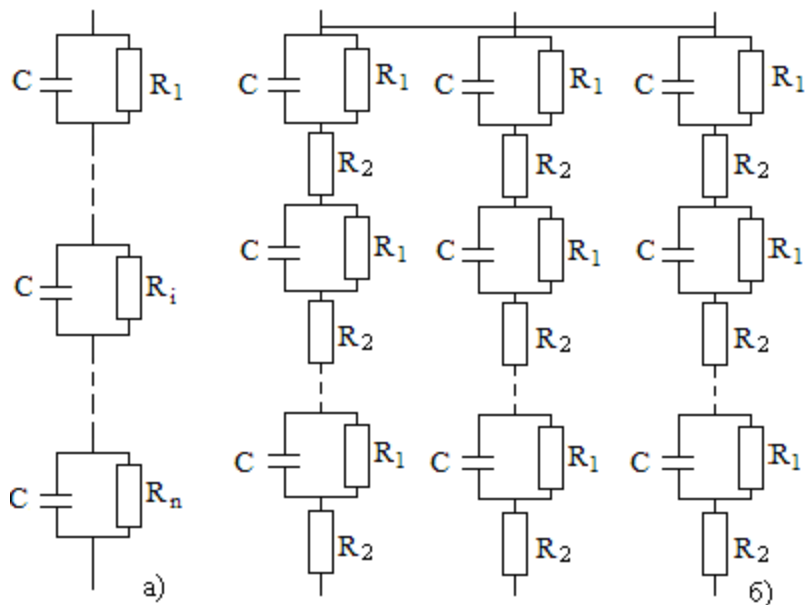


Рис. 4. Эквивалентные электрические схемы биоткани:

а - последовательно соединенная RC - цепь (модель 2),

б - параллельные дорожки с последовательно соединенными RC - цепями (модель 3);

$R$  и  $C$  соответствуют эквивалентному сопротивлению и емкости слоев кожи, подкожной клетчатки глубоко лежащих тканей

Подобная достаточно простая модель может служить в качестве начального представления о характеристиках биоткани.

Моделирование проведено при значениях сопротивления  $R_0$  и  $R_1$  (рис. 5) и емкости 1 мкФ (рис. 6), 10 мкФ (рис. 7) и 100 мкФ (рис. 8) соответственно. На рис. 6-8 приведены зависимости токов и входных сигналов.

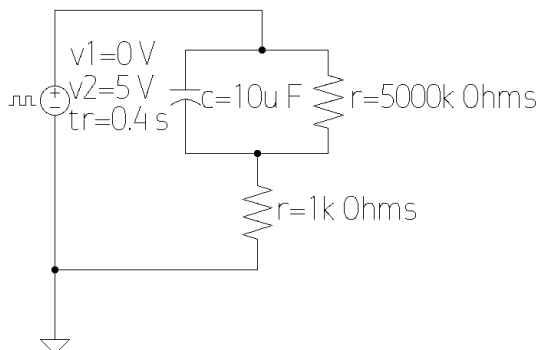


Рис. 5. Схема моделирования для модели

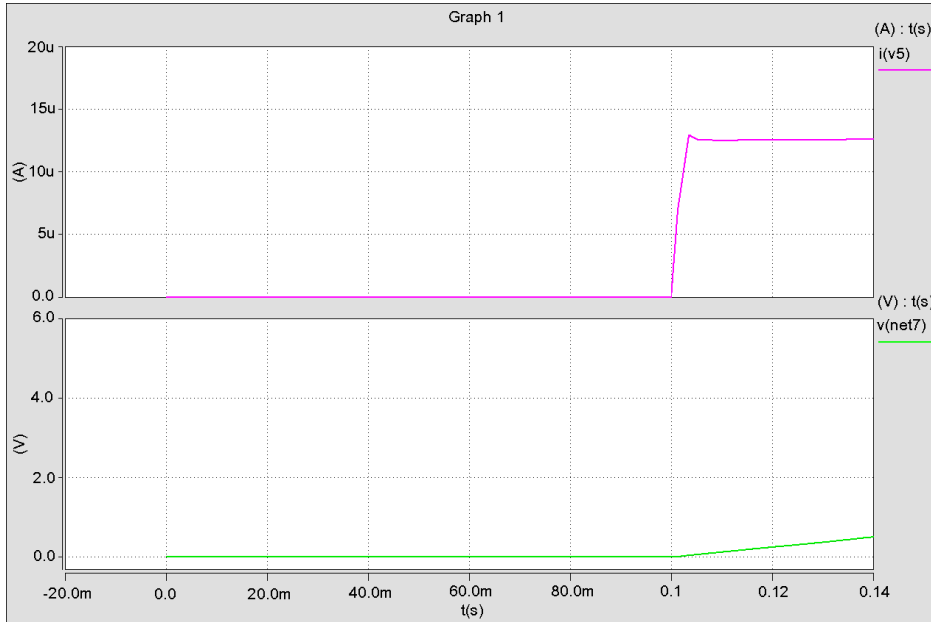


Рис. 6. Временные зависимости тока и входного сигнала при емкости 1 мкФ

Как показывают результаты симуляции, напряжение увеличивается во временном диапазоне от 0,1 до 0,4 с. Уже через 0,4 с приложенное напряжение при протекании тока через сопротивления  $R_0$  и  $R_1$  достигает своего наибольшего значения. Результаты моделирования показывают, что значение тока зависит от значений двух сопротивлений. Как показано на рис. 6-8, значение емкости может иметь существенное влияние на ответную реакцию.

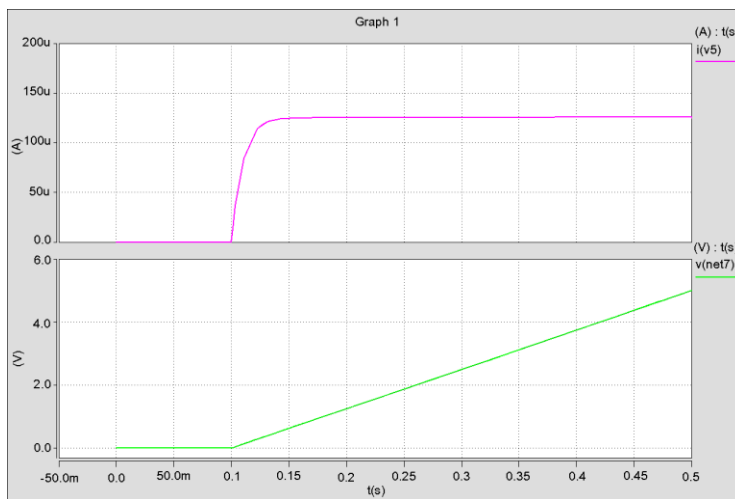


Рис. 7. Временные зависимости тока и входного сигнала при емкости 10 мкФ

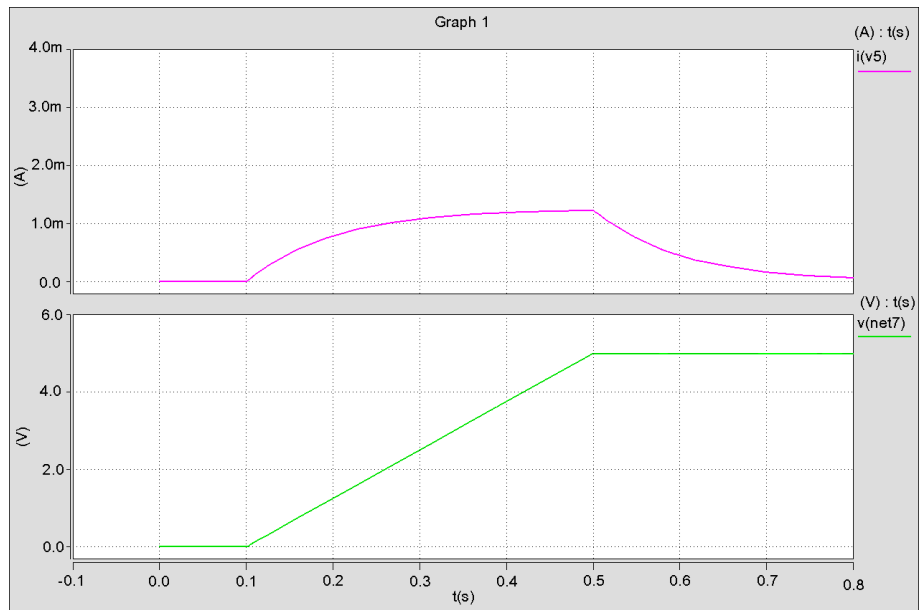


Рис. 8. Временные зависимости тока и входного сигнала при емкости 100 мкФ

**Модель 2.** Модель (рис. 4) представляет собой несколько последовательно соединенных RC - цепей и разработана для моделирования сопротивления с учетом различных значений конденсатора и емкости в зависимости от глубины расположения слоев эпидермиса кожи. Согласно предложенной модели, имеет место уменьшение значений емкости и сопротивления для отдельных слоев рогового слоя, ранее не учтенных в экспериментах. Результат эксперимента имеет особую важность для разработки наиболее точной модели сопротивления кожи, показывающей, что значение сопротивления рогового слоя кожи доминирует в общей составляющей сопротивления кожи.

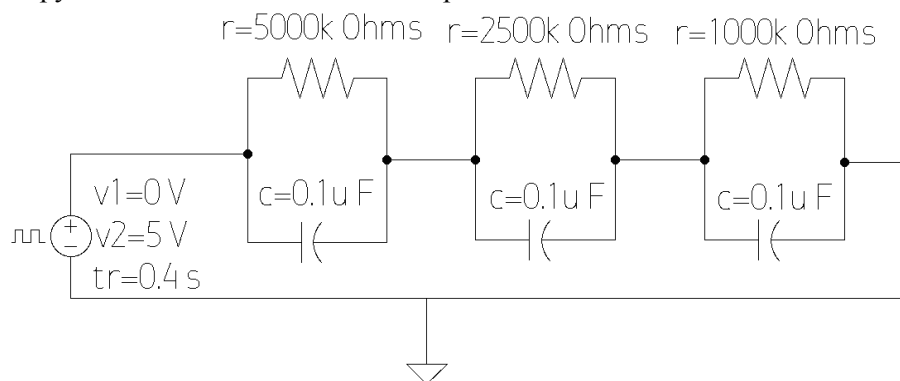


Рис. 9. Схема моделирования для трехуровневой схемы (модель 2)

Моделирование проведено при значениях сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  (рис. 4) и емкости  $0,1 \text{ мкФ}$  для трехуровневой (рис. 9) и шестиуровневой (рис. 10) схем. На рис. 11 и 12 приведены временные зависимости токов и входных сигналов.

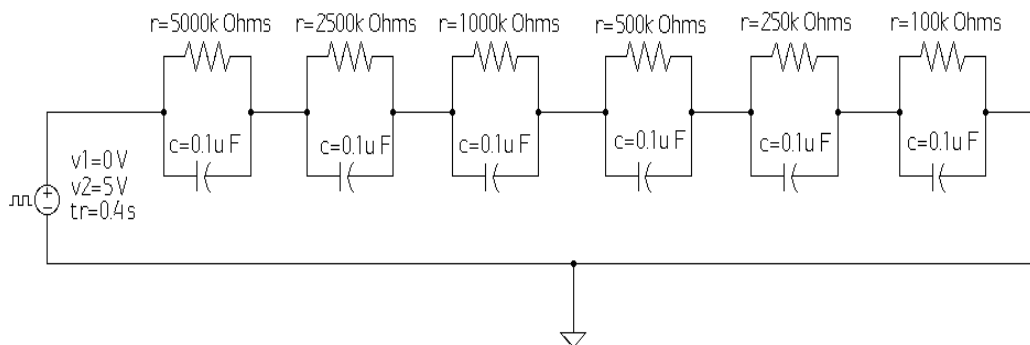


Рис. 10. Схема моделирования для шестиуровневой схемы (модель 2)

Рис. 11 и 12 иллюстрируют значения тока для модели 2, имеющей только три секции (уровень 1), соответствующей модели трех слоев кожи под эпидермисом. Рис. 12 показывает значения тока для модели 2, имеющей только шесть секций (уровень 2). Из рис. 11 и 12 видно, что значения выходных токов могут быть различными в зависимости от типа модели. В обоих случаях уравновешивание значений токов происходит очень быстро (процесс длится  $0,5 \text{ с}$ ).

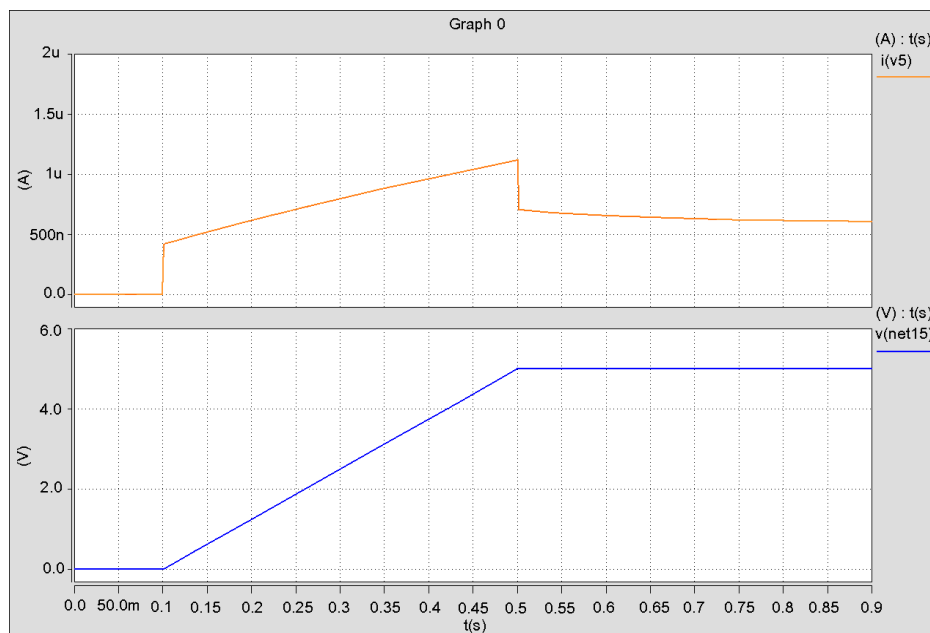


Рис. 11. Временные зависимости тока и входного сигнала для трехуровневой схемы

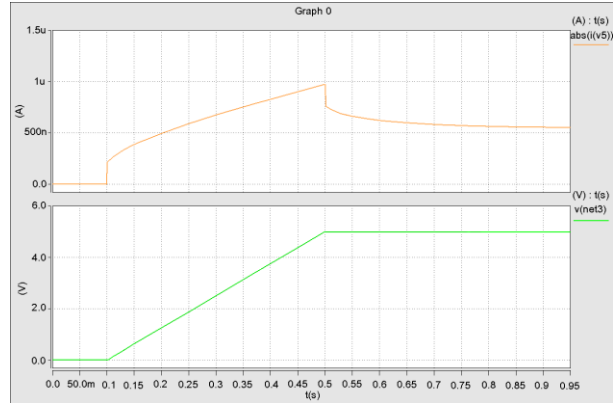


Рис. 12. Временные зависимости тока и входного сигнала для шестирунной схемы

**Модель 3.** Модель (рис. 4) биоткани состоит из нескольких параллельных дорожек, каждая из которых включает несколько RC - цепей, представляющих собой различные слои кожи. Эта модель является наиболее распространенной для сопротивления биоткани, претендующей на наибольшую достоверность.

Моделирование проведено при значениях сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 13) и емкости  $1 \text{ мкФ}$  (рис. 14),  $10 \text{ мкФ}$  (рис. 15) и  $100 \text{ мкФ}$  (рис.16). На рис. 14-16 приведены временные зависимости токов и входных сигналов.

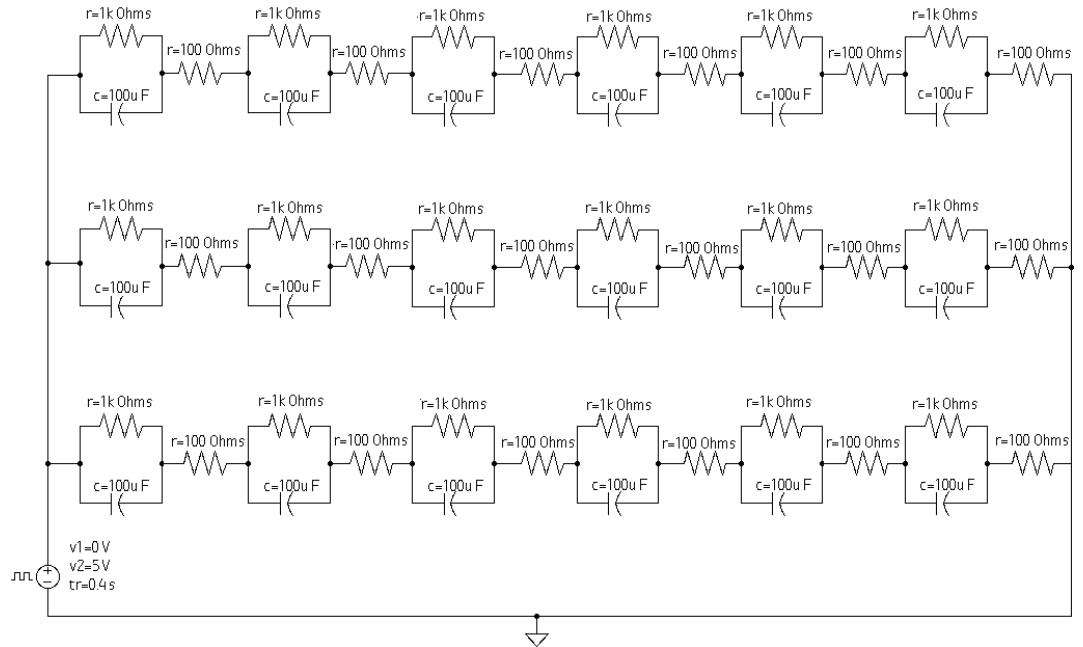


Рис. 13. Схема моделирования для трех дорожек (модель 3)

Зависимости, приведенные на рис. 14, 15, аналогичны по форме, но отличаются друг от друга по значениям токов и напряжений. Несмотря на то, что для получения этих результатов использованы разные модельные схемы (секции 3 и 6 модели), ответные реакции получаются похожими для различных значений емкости. Вертикальная шкала может быть согласована при тщательном подборе значений резисторов.

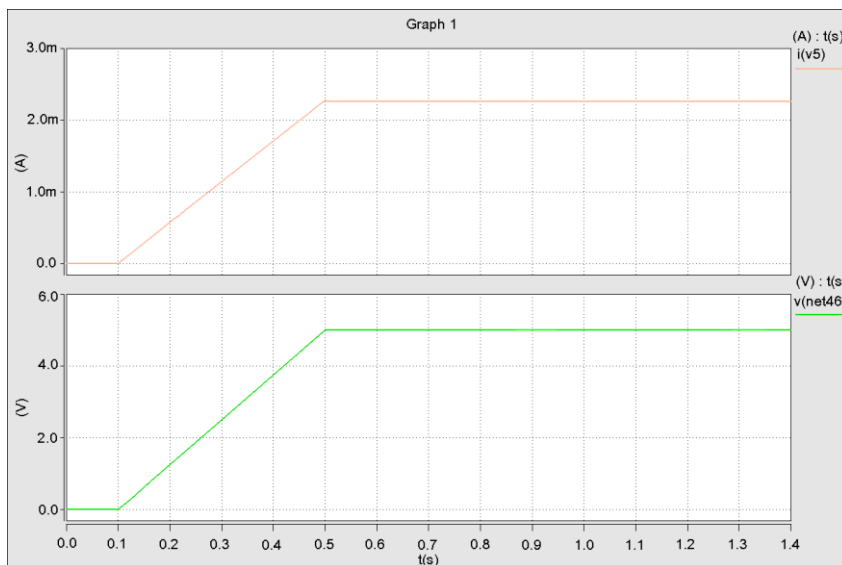


Рис. 14. Временные зависимости тока и входного сигнала при емкости 1 мкФ

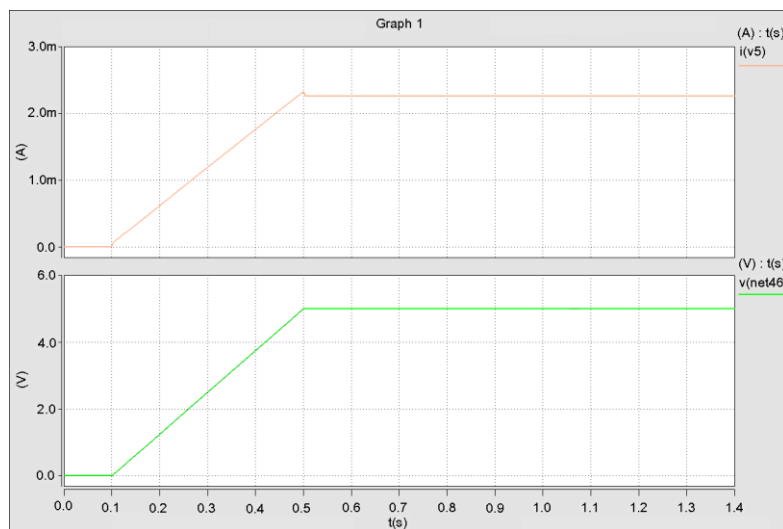


Рис. 15. Временные зависимости тока и входного сигнала при емкости 10 мкФ

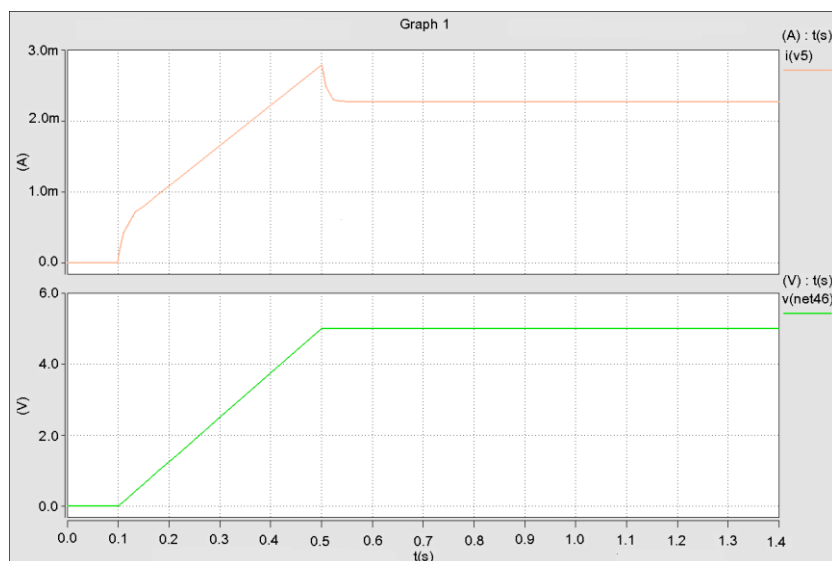


Рис. 16. Временные зависимости тока и входного сигнала при емкости 100 мкФ

### **Выводы**

1. Предложена методика получения моделей биоткани с учетом характеристик эпидермиса, дермы и других слоев (роговой, блестящий, зернистый и т.д.), имеющих пониженное сопротивление, в которой может быть использовано оптимальное количество переменных состояний биосистемы.

2. Проведен анализ моделей биоткани при влиянии значений емкости и сопротивления глубоких слоев ткани, результаты которого подтверждают достоверность данной модели благодаря учету частотной зависимости емкостей эквивалентных схем биоткани.

3. Приведены результаты моделирования моделей биоткани, выполненного с помощью программы HSPICE, которые могут быть использованы для оценки функционального состояния организма.

### **Литература**

1. Кузнецов В.В., Южаков М.М. Моделирование кожной ткани как сложной неоднородной биологической структуры в диагностике дерматологических патологий // Контроль. Диагностика. – М., 2013. - № 13. - С. 253 - 260.
2. Patil B.R. Bioelectrical Impedance Anal. for Bone Density Measurement: Ph.D. dissertation, Elect. Eng / Mumbai University.- Mumbai, Maharashtra, 2008. - 158 p.

3. **Grantham K.H., Pang and DaPeng Qiao.** Skin Impedance Models for Transdermal Drug Delivery // Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, August 9 – 12, 2009.- Changchun, China, 2009.- P. 1784-1788.
4. **Орешкин Н.Ю., Осипов А.Н.** Исследование импедансных характеристик биоткани на основе анализа электромиограмм // Искусственный интеллект. – 2012.- №4. - С. 507-515.
5. **Петросян О.А., Хачикян Л.Э., Петросян О.О.** Анализ сигнала электростимуляции и разработка системы на основе программного пакета LABVIEW // Вестник НПУА-“Информационные технологии, электроника, радиотехника”.-2015.- №1. - С. 82-90.

*Поступила в редакцию 15.09.2015.  
Принята к опубликованию 25.11.2015.*

## ԿԵՆՍԱԲԱՆԱԿԱՆ ՕՐՅԵԿՏՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ

**Օ.Հ. Պետրոսյան, Լ.Է. Խաչիկյան**

Հյուսվածքի խորը շերտերի ունակության և դիմադրության հաշվառմամբ առաջարկվել է հյուսվածքի մոդելի կառուցման մեթոդիկա, որը ապահովում է մոդելի հավաստիությունը: Առաջարկվում է մոդելավորման ժամանակ հաշվի առնել կենսահյուսվածքին համարժեք սխեմաների ունակությունների հաճախականային կախվածությունը: Կատարված է մոդելների վերլուծություն, երբ կենսահյուսվածքը դիտարկվում է գծային համակարգի տեսքով: Ներկայացված են մոդելավորման արդյունքները (կենսահյուսվածքով հոսանքի աճը), որը կատարված է HSPICE ծրագրով SAED EDK 28 նմ տեխնոլոգիական նորմերով, որոնք կարող են երաշխավորվել օրգանիզմի ֆունկցիոնալ վիճակի գնահատման համար:

**Առանցքային բաներ.** էլեկտրական մոդել, կենսաբանական համակարգ, կենսահյուսվածք, համարժեք սխեմա, մոդելավորում:

## ANALYSIS AND SIMULATION OF BIOLOGICAL OBJECTS

**O.H. Petrosyan, L.E. Khachikyan**

A method for constructing a model of biological tissue taking into account the influence of capacitance and resistance of the deep layers of tissue, which provides the accuracy of the model is proposed. It is proposed to take into account the frequency dependence of capacitance equivalent circuits of biological tissue at simulating. The analysis of the models, considering the biological tissue in the form of a linear system is carried out. Simulation results (increase in the current through the biological tissue) obtained using HSPICE with technological norms SAED EDK 28 nm are introduced, which can be recommended to evaluate the functional state of an organism.

**Keywords:** electric model biological system, biological tissue, equivalent circuit modeling.

UDC 621.315:621.382

## I-V CHARACTERISTICS OF THIN FILM Pt/Ba<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>TiO<sub>3</sub>/Pt STRUCTURES UNDER THE IMPACT OF ELECTRON BEAM IRRADIATION

V.V. Buniatyan, V.M. Tsakanov, G.S. Karoyan, H.R. Dashtoyan

National Polytechnic University of Armenia

A detailed theoretical study of the leakage currents in ferroelectric Pt/Ba<sub>x</sub>St<sub>1-x</sub>TiO<sub>3</sub>/Pt (Pt/BSTO/Pt) thin film structures is presented, when the film is irradiated by an electron beam. It is shown, that both the Schottky barrier thermal/field assisted emission and Poole-Frenkel (FP) emission from the oxygen vacancy conditioned electron traps may take place simultaneously if the absorbed energy of electron's from the electron beam is higher than its activation energy to release to the conduction band of the ferroelectric.

**Keywords:** leakage current, ferroelectric, trapping center, Schottky barrier, Poole-Frenkel emission, oxygen vacancy.

**Introduction.** The leakage current in thin ferroelectric film devices (memory cell, varactor etc.) has been a subject for extensive studies [1-7]. The magnitude of the leakage current and the shape of the *I-V* curve depend on the conduction mechanism of the dielectric process in the ferroelectric and of the difference in the work function between the electrode and ferroelectric, nature and density of the interface states. Schottky emission [5,8,9], Frenkel-Poole emission [10,11], tunneling (field) emission, space-charge limited regime [1-5, 12], ionic conductance, hopping conductance etc. have been considered. They are characterized by their voltage and temperature dependencies:

$$T^2 \cdot \exp\left(\beta V^{\frac{1}{2}} T^{-\frac{1}{2}} - \frac{q\Phi}{kT}\right), V \cdot \exp\left(2\beta V^{\frac{1}{2}} T^{-\frac{1}{2}} - \frac{q\Phi}{kT}\right), \\ V^2 \cdot \exp\left(-\frac{Z}{V}\right), a \cdot \left[\frac{V}{d} + \beta \left(\frac{V}{d}\right)^2\right],$$

where *k* is the Boltzman's constant, *T* is the absolute temperature, *q* is the electron charge. In general, it is not easy to distinguish between these mechanisms. Typically, at lower fields and temperatures (300 K and 10<sup>4</sup> – 10<sup>5</sup> V/cm), the Schottky emission dominates, while at high fields (10<sup>6</sup> V/cm) and high field and temperatures, the Frenkel-Poole emission becomes dominant. The Schottky emission and space-charge limited current are not independent. The main experimental results reported for BST and PZT indicated a strong correlation of the leakage current with crystalline structure of the film [1-12]. Currently, it is well established that the oxygen vacancies play a major role. The oxygen concentration is not constant throughout the film. It decreases

sharply near the metal electrodes [1, 4, 7, 12, 13-15], approximately 50% of its value in the center (~20 nm from the Pt surface). This oxygen deficient region in the film may have n-type conductivity in contrast to the p-type in the bulk of the film, where the density of the oxygen vacancies is not high. In oxide perovskite ferroelectrics, there are three oxygen ions per unit cell. The density of the oxygen ions in the bulk of the film is  $1,5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$  [7-9], while in the 20 nm thick 50% depleted (by oxygen) interface layer it is  $3 \cdot 10^{20} / \text{m}^2$ . The missing oxygen results in an image charge on Pt electrode. The surface density of the charges on Pt electrode is  $3 \cdot 10^{16} \text{ oxygen/cm}^2$ . However, not all oxygen vacancies trap electrons. The increased density of the oxygen vacancies at the interface results in a dipole layer-lowering the electrical field in the film (due to the increase of the voltage drop over the Pt/BST interfaces). The non-uniform distribution of the oxygen vacancies near the interfaces causes bending of the energy bands and changes the shape of the barrier, making it for charges easier to overcome. On the other hand, the experimentally observed leakage currents may be explained by conductivity associated with the oxygen vacancies [1-4,13-18]. The oxygen vacancies are the most mobile in perovskite ferroelectrics. The experimental results of both monocrystalline and polycrystalline BSTO at high temperatures [1-4, 7-9] shows that the conductivity of undoped polycrystalline titanate oxides depend on oxygen partial pressure of the ambient gas. At sufficiently high temperatures, the oxygen vacancies are double ionized, each supplying two electrons to the conduction band. This process at low oxygen partial pressure can be described as [4, 7-9]:  $\text{O}_2 \rightarrow 0.5\text{O}_2 + \text{V}_\text{o}^{++} + 2\text{e}^-$ . Oxygen vacancies act as donors [1-6, 13-16] causing n – type conductivity. Moreover, depending on the density of the oxygen vacancies and the density of the background impurities, the conductivity may change from n– to p-type [7, 8, 16, 17]. The interfacial vacancies cause distortion of the crystal lattice and polarization fields around the vacancy. This makes the levels deeper and causes them to act as charge traps [16, 17]. The interfacial built-in electric fields associated with the trapping centers and oxygen vacancies results in [16] changes in the interfacial permittivity of the films [18]. It is worthwhile to notice that the oxygen vacancies are not to be only the main defect of ferroelectric films. The Ba, Sr vacancies in BSTO, result in the shallow acceptor levels. Dopants also result in levels in the forbidden band. Nb gives a shallow level [1, 16, 19], while Mn, Gr, and Fe give levels near midgap. Pt gives a deep level near midgap, too [1, 16, 19].

Most of the metal-ferroelectric junctions lie between the Schottky and Bardeen limits. In Pt – SrTiO<sub>3</sub> contact, the effect of vacancies on the barrier height becomes important for the density of vacancies  $10^{18}$ – $10^{22} \text{ cm}^{-3}$  [1-9, 19]. The, electrochemical interaction of the electrodes with carriers in the ferroelectric may induce “dead layers” [19, 20]. In the case of interfacial surface states and/or dopants there may be a transfer

of charge, and the barrier height cannot be defined as a difference between the metal work function  $\Phi_m$  and the insulator electron affinity  $\chi$  [19, 20]. In this case, the resulting barrier height is:  $\Phi \cong S(\Phi_m - \Phi_S) + (\Phi_S - \chi) + S\Phi_S$ . The calculated barrier height for SrTiO<sub>3</sub> on Pt is about 0.9 eV [1, 7], which is close to the 0.8 eV found by photoemission and the 1.1 eV [1-5, 19, 20]. In summary, for low density of oxygen vacancies<sup>1</sup>, the undoped ferroelectrics titanates films are considered to have slightly p-type conductivity due to the background impurities (i.e. [Na<sup>+</sup> for Pb<sup>+2</sup>, Fe<sup>+3</sup> for Ti<sup>+4</sup> [1,7,16,19,20]). In reality, most of the ferroelectric films are rich in oxygen vacancies, especially at the interfacial with the electrodes regions. The oxygen vacancies act as donor ions, causing n-type conductivity. In fact, the Kelvin probe study [1, 7, 12, 19, 20] proved that in Pt-BaTiO<sub>3</sub> thin film structure, the work function changes from 2.5± 0.3 eV for surfaces to 4.4± 0.4 eV the bulk of the material.

**1. The proposed model of the thin film Pt/Ba<sub>x</sub>St<sub>1-x</sub>TiO<sub>3</sub>/Pt structure.** The three layer model to be considered consists of metal electrodes, Fig.1, n-type interfacial oxygen vacancy rich layers (uncompensated donor concentration  $n_d$  with the thickness of  $\delta_l$ , with the homogeneous distribution of the vacancies, and a poor p-type ferroelectric film (core) [21]. It is assumed, that the concentration of the oxygen vacancies is large at the interfacial with the metal (Pt) contact region, and that some of these vacancies trap electrons and create space-charge regions.

For simplicity, both metal/ferroelectric contacts assumed to be identical. It is also assumed that there are interfacial surface states between the metal contacts and n-type interfacial regions. The thickness of these layers with the surface states is denoted by  $\delta_0$ . The density of the oxygen vacancies in the middle part of the ferroelectric film (core) is assumed to be relatively low. The work function (~ 5.6 eV) of Pt is greater, than that of the ferroelectric film (~3.2 eV), which means that the currents will be emission limited. In equilibrium and at low temperatures all of the trapped electrons would be in traps: at high temperatures and in the presence of an applied field and electron beam irradiation most of these electrons will be excited into shallow traps to the conduction band, either due to the action of the field and electron beam interaction.

The  $I$ - $V$  characteristic of the proposed model is considered neglecting the diffusion currents associated with the charge concentration gradients. It is also assumed that electrons flow generally by Poole-Frenkel emission (Schottky intrinsic emission) under the influence of simultaneously applied electric field and electron beam irradiation. Additionally, it is assumed that electrons are released from the trap due to absorption of enough energy from the electron beam and can move in the electric field so that the re-trapping process may be neglected.

---

<sup>1</sup>These traps for electrons are assumed to be neutral when occupied and positive charged when empty (i.e., they are donors).

**2. Model of the current mechanisms in Pt/Ba<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>TiO<sub>3</sub>/Pt structure.**

**2.1. Poole-Frenkel mechanism.** As it is noted above, if the ferroelectric film contains traps for electrons (conditioned by oxygen vacancies) and is under the simultaneously acting electric field and electron beam irradiation, and, if the adsorbed energy of the trapped electrons from the electron beam is enough to release from traps, the *I-V* characteristics would be exhibited not only on applied voltage dependence, but be changed under the electron beam intensity. For the classic interpretation, in the case of only the applied field in thin film it is expected that Poole-Frenkel emission will “start” dominant up to 1 MV/cm. In this case, it is expected that Poole-Frenkel emission can take place for the low electric field too due to the electron beam. Generally, Poole-Frenkel effect [10, 11] describes the lowering of the potential barrier for carrier thermoemission from a localized electronic state as a result of composition of its attractive, Coulomb-like potential that is inversely proportional to the distance, *r*, and of the potential of a uniform external electrical field, *F* (see Fig. 2). For this phenomenon to occur, the defect must acquire a net charge upon the emission of the carrier, i.e. in p-type material Poole-Frenkel effect is expected to occur for acceptor traps and in n-type material – for donor traps. For trap states with Coulomb potential, the charge transport is governed by the Frenkel-Poole emission which is very similar to the Schottky emission [1-12]. It is necessary to note, that while in Schottky mechanism, the lowering of the barrier occurs uniformly for all the directions of the carrier motion in the hemisphere centered in the direction of the field, i.e. the probability of escape is enhanced by the same factor  $\exp(\beta_S E^{1/2}/kT)$  for all the attempted directions of escape, the situation for Poole-Frenkel effect is more complicated. In this case, it is necessary to take into account the effect of the angle between the direction of escape and the direction of the field *E*.

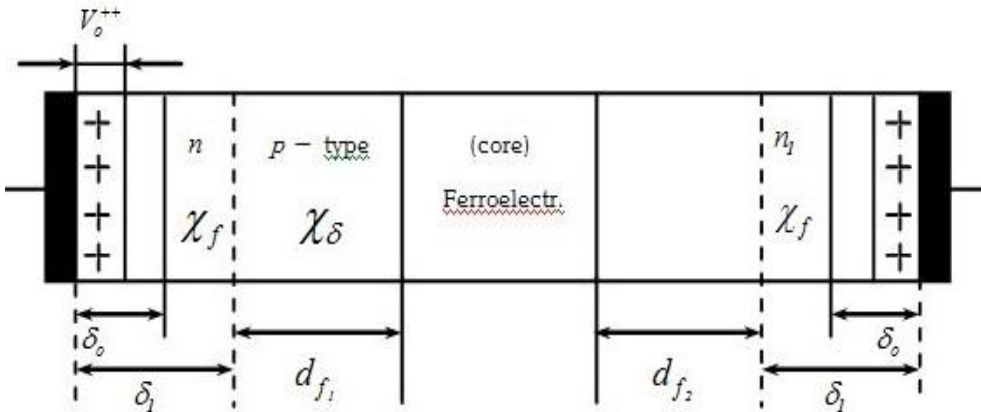


Fig.1. 1D model of a thin film Pt/BSTO/Pt structure [18]

The obtained expression (16) is based on the model, on which the maximum barrier lowering  $\left\{\beta_{PF}[E(x)]^{\frac{1}{2}}\right\}$  occurs only in one particular direction in space, all other directions have to overcome a higher barrier.

Fig.2b helps to analyze the relationship between trapped electrons due to Poole – Frenkel effect. Arrows indicate the possible mechanisms of electron emission: thermal ionization over the lowered barrier (PF effect), direct tunneling (DT) into the conduction band (CB), and phonon assisted tunneling (PAT) [10,11].

Assume that a ferroelectric film contains traps for electrons, which have  $E_{nt}$  energy levels below the conductance bands. The electron (donor type) trap densities are denoted by  $N_{td}$  (Fig.2).

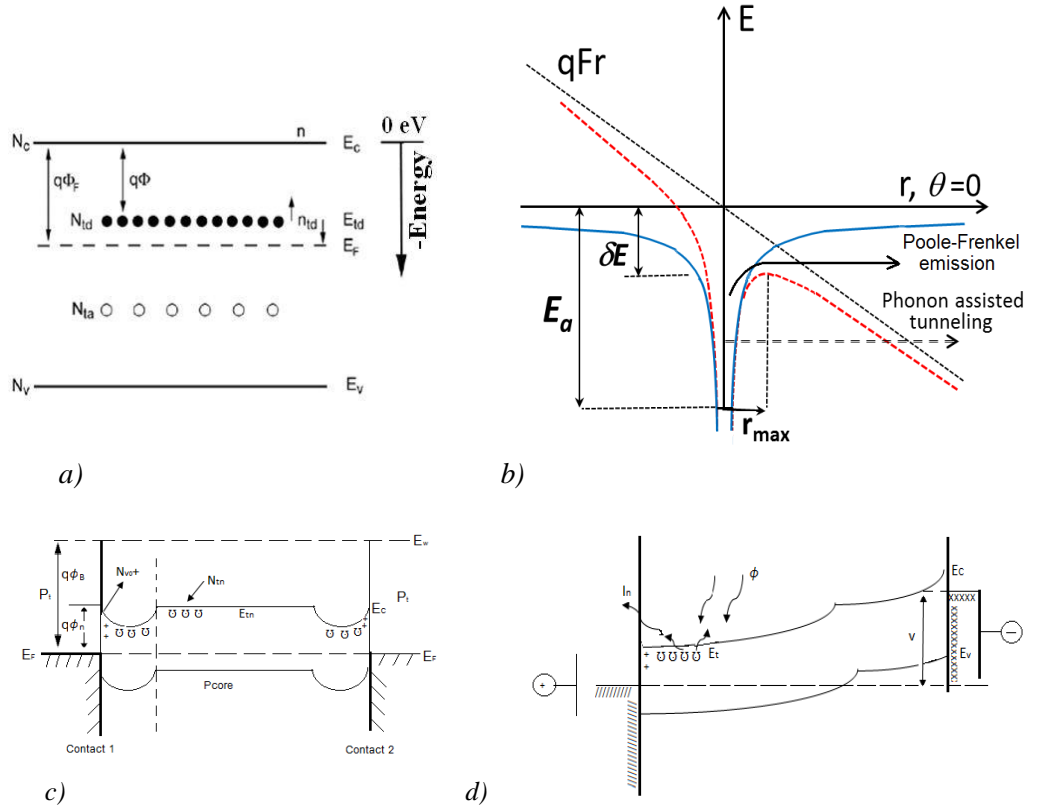


Fig.2. Schematics of trap levels (one-dimensional) for electrons (a), lowering of the barriers by  $\delta E$  under the applied high field,  $F$ , [10,11] (b), under equilibrium condition (c) and at irradiation of electron beam (d)

Assume that free electrons in the conduction band of the ferroelectric are a result of only oxygen vacancies and neglecting the intrinsic free electrons in ferroelectrics.

Let's consider that the oxygen vacancies near the metal contact is  $N_{v_0}$  which act as "donors" and its average energy depth in respect to the edge of the ferroelectric conductance band ( $E_c$ ) is  $E_t$ .

Assume, that the concentration of oxygen vacancies conditioned by the trap density/unit energy is:

$$N_t \cong N_{v_0} \exp\left(\frac{E_t - E_c}{kT}\right).$$

Then, for the concentration of ionized "donors", i. e, for the concentration of free electron, we will have:

$$N_{v_0^+} = n_{c_0} \approx N_{v_0} \left[ 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right)} \right], \quad (1)$$

where  $g$  is the ground-state degeneracy for donor levels ( $g=2$ ),  $k$  is the Boltzmann's constant,  $T$  is the absolute temperature,  $E_F$  is the Fermi level energy.

On the other hand, using the well-known expression for free electron concentration:

$$n_{c_0} = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right) \quad (2)$$

for  $n_{c_0}$  we can obtain:

$$n_{c_0} \cong \frac{N_c}{4} \exp\left(\frac{E_t - E_c}{kT}\right) * \left\{ \sqrt{1 + \frac{8N_{v_0}}{N_c \exp\left(\frac{E_t - E_c}{kT}\right)}} - 1 \right\}, \quad (3)$$

where  $N_c$  is the effective density of states in the conduction band.

For the concentration of trapped electrons at thermal equilibrium we will have:

$$\begin{aligned} n_{t_0} = N_{v_0} - N_{v_0^+} &= \frac{1}{1 + 0.5 \exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right)} = \frac{1}{1 + 0.5 \exp\left(\frac{E_t}{kT}\right) * \frac{N_c}{n_{c_0}} \exp\left(-\frac{E_c}{kT}\right)} = \\ &= \frac{n_{c_0}}{n_{c_0} + 0.5 N_c \exp\left(\frac{E_t - E_c}{kT}\right)}, \end{aligned} \quad (4)$$

Now, assume that in case of the metal-ferroelectric-metal structure, the electric field and, simultaneously the electron beam excitation (irradiation) is applied. It is assumed that under the influence of the electric field and the electron beam, irradiation will take place. Poole-Frenkel emission of electrons from oxygen vacancies condition the trap levels to the conduction band of ferroelectric (Fig. 2). It means that the escape rate of electrons from trap levels to the conduction band depends not only on the electric field (as in usual Poole-Frenkel effect) but also depends on the electron beam irradiation flux intensity  $\Phi$  (electr./cm<sup>2</sup>) if the absorbed energy of trapped electrons is larger than the  $(E_t - E_c)$ .

Assume that traps, which exhibit a coulombic attraction in respect to current carriers (electron in this case) is necessary. Thus traps are assumed to be neutral when

occupied and positively charged when empty (i.e., they are “donors”). An expression for the captured electrons  $n_t(x)$  under the steady condition (that is under the simultaneously applied electric field and electron beam irradiation) may be obtained by equating the rate of electron capture from the conduction band ( $r_1$ ) to the rate of electron release from traps ( $r_2$ ). Considering an infinitesimal trap energy range between  $E_t$  and  $E_t+dE_t$ , the expression for  $r_1$  can be written as:

$$r_1 = n_c N_t (1 - f_n) \sigma v_{th} dE_t, \quad (5)$$

where  $\sigma$  is the capture cross section,  $v_{th}$  is the electron thermal velocity,  $f_n$  is the occupancy factor which is a function of trap the energy.

The escape rate can be presented as:

$$r_{zn} = N_t f_n v \exp\left(-\frac{E_t - E_c}{kT}\right) \exp(\beta_{pF} E^{1/2}) \exp(K_n \Phi) dE_t, \quad (6)$$

$$\beta_{pF} = 2\beta_s = 2\left(\frac{q}{kT}\right) \left(\frac{q}{\pi \epsilon_{op}}\right)^{1/2}, \quad (7)$$

where  $q$  is the electronic charge,  $\epsilon_{op}$  is the high frequency dielectric permittivity of ferroelectric,  $\beta_s$  is the Schottky slope,  $\beta_{pF}$  is the slope of the  $\log I-E^{1/2}$  plot when the Poole-Frenkel mechanism dominates the electronic conduction,  $K_n = \frac{dn_c}{d\Phi} \frac{1}{n_{t0}}$  is the rate of the electron escape from the trap center to the conduction band due to the interaction with the electron beam (due to the absorption of corresponding energy from electron beam).

Let's assume that the entrance of electrons (after electric field is applied) from the cathode (metal contact) into the conduction band of the ferroelectric film by Schottky–thermoionic emission is described by

$$J = J_S \exp\left(\beta_s E_{(0)}^{1/2}\right), \quad (8)$$

where  $J_S$  is a temperature-dependent constant.

The continuity of the steady-state current inside the film requires that  $J$  be constant and independent of the position in the film. Thus, neglecting the diffusion since the electric field is assumed to be high,  $J$  is given by

$$J = q n_c(x) \mu E(x), \quad (9)$$

where  $n_c(x)$  is the free electron density when the electric field and the electron beam irradiation is applied,  $\mu$  is the electron mobility, which is assumed to be independent of the field strength,  $E$  is the electric field.

The electric field distribution in the ferroelectric field can be determined from Poisson's equation:

$$\frac{\partial[\epsilon_f(E)E(x)]}{\partial x} = \rho(x), \quad (10)$$

where  $\rho(x) = q(N_{v0}^+ - n_t - n_c)$ ,  $n_t$  and  $n_c$  are the trapped and free electron concentrations, respectively  $\epsilon_f$  is the ferroelectric film dielectric permittivity, which is

assumed to be a nonlinear dependence on the electric field [1,19-21],

$$\varepsilon_f(E) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon(0)}{1 + AE^2} = \frac{\varepsilon_r}{(1 + AE^2)}, \quad (11)$$

where  $\varepsilon_r = \varepsilon_0 \varepsilon(0)$ ,  $\varepsilon(0)$  is the ferroelectric dielectric permittivity at zero field,  $\varepsilon_0$  is the free space dielectric constant ( $8,85 \cdot 10^{-12} \text{F/m}$ ), and  $A$  is constant (for example, for  $\text{SrTiO}_3 A \cong 0,45 \cdot 10^{-11} \text{cm}^2/\text{V}^2$ ) [1,19-21].

Then, using (11) for (10) we have:

$$\frac{\varepsilon_r}{\beta} \left(1 - \frac{2AE^2}{\beta}\right) \frac{dE}{dx} = \rho(x), \beta = 1 + AE^2. \quad (12)$$

Integration of Eq.(12) for boundary condition  $x=l$ ,  $E=E_0$ , where  $l$  is the length of the film, gives:

$$\frac{E_0}{1 + AE_0^2} = \alpha l, \quad \alpha = \frac{q(N_{V0}^+ - (n_c + n_t))}{\varepsilon_r}. \quad (13a)$$

From (13), for the free electron concentration we can get:

$$n_c = N_{V0}^+ - n_t - \frac{\varepsilon_r E_0}{ql(1 + AE_0^2)}. \quad (13b)$$

On the other hand, it is well-known [22-26] that the energy  $\Delta E_{eb}$  which may absorb atoms from the electron beam during the interaction can be expressed as:

$$\Delta E_{eb} \cong \frac{4meM_a}{(me + M_a)^2} E_e, \quad (14)$$

where  $E_e$  is the flying electron average energy,  $m$  is the electron mass and  $M_a$  is the atom's mass.

Returning to  $r_2$ , it is necessary to note, that  $r_2$  depends upon the concentration of centers which are occupied by electrons and on the electron relaxation time  $T_{rx}$ . In our case, when the electric field and an electron beam excitation are applied on the ferroelectric, for  $T_{rx}$  we can use the expression:

$$T_{rx} = \left(\frac{1}{\nu}\right) \exp[(E_{tn} - \Delta E_{PF} - \Delta E_{bL})/kT], \quad (15)$$

where  $\nu$  is the attempt to escape frequency,  $\Delta E_{PF}$  represents the lowering of the trap barrier height assuming a Poole-Frenkel mechanism, i.e.

$$\Delta E_{PF} = \beta_{PF} kT E^{1/2},$$

and  $\Delta E_{bL}$  represents a so called "lowering" in the trap barrier height due to the absorption of the trapped electron's energy from the electron beam.

If the irradiated surface of the ferroelectric is  $S$ , the intensity of the electron beam flux is  $\Phi$  (*electr./cm<sup>2</sup>*),  $\Delta E_{bL}$  can be expressed as:

$$\Delta E_{bL} = S\Phi \frac{\Delta n_c}{nt} \Delta E_{eb} = K_n \Phi, \quad (16)$$

where  $K_n = S \frac{\Delta n_c \Delta E_{eb}}{kTnt}$ , and  $\Delta n_c$  is the fraction of the trapped electrons which has release to the conduction band.

Equating  $r_1$  to  $r_2$  and using Eq's (5)-(8), the occupancy factor  $f_n$  can be expressed as:

$$f_n = \left\{ 1 + q \frac{\text{vexp}\left(-\frac{\Delta E_t}{kT}\right) \exp(\beta_{pF} E^{1/2}) \exp(K_n \Phi) \mu E}{J_s \exp(\beta_s E_{(0)}^{1/2})} \right\}^{-1}. \quad (17)$$

An expression for  $n_t(x)$ , the total number of the trapped electrons after the electric field and electron beam irradiation, then it follows:

$$n_t(x) = \int_0^{E_{tn}} f_n N_{v_0} dE_t = \frac{N_{v_0} E_t}{(1+\gamma_3) kT}, \quad (18)$$

where  $\gamma_3 = \frac{\text{vexp}(\beta_{pF} E^{1/2}) \exp(K_n \Phi) q \mu E}{\sigma_{vth} J_s \exp(\beta_s E_{(0)}^{1/2})}$  and it is assumed that  $\gamma_3 \gg \frac{E_{tn}}{kT} \gg 1$ .

Determining the free electron concentration for the condition:

$$n_c = N_{V0}^+ - n_t - \frac{\epsilon_r E_0}{q l (1 + A E_0^2)},$$

finally, for the  $J$  we will have:

$$J \left[ \frac{A}{cm^2} \right] = q \mu E_0 \left\{ N_{V0}^+ - n_t - \frac{\epsilon_r E_0}{q l (1 + A E_0^2)} \right\}. \quad (19)$$

With the increase of the electric field ( $E$ ), electron beam intensity,  $\Phi$ , the concentration of the trapped electrons,  $n_t$ , is decreased. It means, that the concentration of free electrons is increased which, in turn must lead to an increase in the free electron concentration and consequently an increase in  $J$  for other equal conditions.

**Conclusions.** As it follows from expressions (18) and (19), with the increase of electric field ( $E$ ), electron beam intensity,  $\Phi$ , the concentration of the trapped electrons,  $n_t$ , is decreased. It means, that the concentration of free electrons is increased which, in its turn, must lead to an increase in the free electron concentration and consequently to the increase of  $J$  for other equal conditions.

*This work was supported by State Committee of Science MES RA, in the frames of the research project № SCS 14AR-2f12.*

## References

1. **Dawber M., Raba J.F., Scott J.F.** Physics of thin-film ferroelectric oxides // Rev. of Modern Phys.- 2005.- V.77.- P.1083-1130.
2. Leakage currents in Ba<sub>0.75</sub> Sr<sub>0.25</sub> TiO<sub>3</sub> thin films for ultrahigh-density dynamic random access memories / **G.W. Dietz, M. Schumacker, R. Waser, et al** // J. Appl.Phys.- 1997.- V.82, №5.- P. 2359-2364.
3. **Saha S., Kaufman D.X., Streiffer S.K., Auciello O.** Anomalous leakage current characteristics of Pt/(Ba<sub>0.75</sub>,Sr<sub>0.25</sub>)Ti<sub>1+y</sub>O<sub>3+z</sub>/Pt thin films grown by metal-organic chemical vapor deposition // J. Appl.Phys.- 2003.-V. **28**, №24.- P. 3866-3868.

4. The electronic conduction mechanism in barium strontium titanate thin films/ **S. Zafar, Robert E. Jones, Bo Jiang, B. White, et al**// Appl.Phys. Lett.- 1998.-V.73, №24.- P. 3533-3535.
5. Hydrogen induced tunnel emission in Pt/(Ba<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>)Ti<sub>1+y</sub>O<sub>3+z</sub>/Pt thin films Capacitors/**J.D. Baniecki, R.B.Laibonitz and T.M.Shaw, C. Parks, et al** // J. Appl.Phys.- 2001.- V.89, №5.-P. 2873-2885.
6. **Stolichnov I., Tagantsev A.** Space –Charge influenced-injection model for conduction in Pb(Zr<sub>x</sub>Ti<sub>1-x</sub>)O<sub>3</sub> thin films // J. Appl.Phys.- 1998.-V. 84,6.- P. 3216-3225.
7. **Gerblinger J., Meixner H.** Electrical conductivity of sputtered films of strontium titanate // J. Appl. Phys. - 1990.-V. 67, N12.- P. 7453-7459.
8. **Robertson J., Chen C.W.** Schottky barrier heights of tantalum oxide, barium strontium titanate, lead titanate, and strontium bismuth titanate // J. Appl.Phys.- 1999.- V.74, №8.- P. 1168-1170.
9. Metal-ferroelectric-metal structures with Schottky contacts. Analysis of the experimental current-voltage and capacitance-voltage characteristics of Pb(Zn,Ti)O<sub>3</sub> thin films/ **L. Pintilie, I. Boerasu, M.J.M. Gomes, et al** // J. Appl.Phys.- 2005.- V.98.- P. 124104-124104.
10. **Mitrofanov O., Manfa M.** Poole-Frenkel electron emission from the traps in AlGaIn/GaN transistors // J. Appl. Phys.- 2004.- V.95.- P. 6414-6419.
11. **Antula J.** Hot-electron concept for Poole-Frenkel conduction in amorphous dielectric solids // J. Appl.Phys.-1972.-V.94, №11.- P. 4663-4668.
12. **Raymond M.V., Smyth D.M.** Defects and charge transport in perovskite ferroelectrics // J. Phys. Chem Solids.- 1996.- V.57, N10.- P. 1507-1511.
13. **Simmons J.G.** Potential barriers and Emission-limited Current Flow Between Closely Spaced Parallel Metal Electrodes // J. Appl. Phys.- 1964.- V.35.- P. 2472-2481.
14. Morphology and oxygen vacancy investigation of strontium titanate-based photo electrochemical cells /**D. Hertkorn, U. Gleißner, C. Megnin, et al** // Journal of Materials Science.- 2015.-V.50, N1.-P. 40-48.
15. Quantitative measurement of space –charge effects in lead ziconate-titanate memories / **J.F. Scott, C.A. Aranjó, B.M. Melnick, L.D. McMillan, R. Zulleg** // J. Appl.Phys.- 1991.- V.70, №70.- P. 382-388.
16. **Robertson J.** Energy levels of point defects in SrTiO<sub>3</sub> and related oxides // J. Appl. Phys.- 2003.- V. 93, N2.- P. 1054-1059.
17. **Maier J., Jamnik J., Leonhardt M.** Kinetics of oxygen stoichiometry changes // Solid State Ionics.- 2000.-V. 129.- P. 25-32.
18. **Buniatyan V.V., Martirosyan N.W., Vorobiev A., Gevorgian S.** Dielectric model of point charge defects in insulating paraelectricperovskites // Journal of Applied Physics.- 2011.- 110.- P. 094110-1-11.
19. **Dawber M., Raba J.F., Scott J.F.** Physics of thin-film ferroelectric oxides // Rev. of Modern Phys.- 2005.- V.77.- P. 1083-1130.
20. Ferroelectric Materials for Microwave Tunable applications / **A.K. Tagantsev, V.O. Sherman, K.F. Astafiev, et al** // J. of Electroceramics.- 2003.- P. 11-66.

21. Oxygen vacancy affect on ferroelectric characteristics / **V.V. Buniatyan, N.W. Martirosyan, V.K. Begoyan, et al** // Proceed. of Engineering Academy of Armenia (PEAA). Part 1.- V.8, N2.- P. 2011; Part 2, V.8, N3.- P. 542-429.
22. **Коршунов Ф., Гатальский Г., Иванов Г.** Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах.- Минск: Наука и техника, 1978.- 230 с.
23. Dielectric properties of electron irradiated PbZrO<sub>3</sub> thin films / **S. Aparna, V.M. Jali, G. Sanjeev, et al** // Bull. Mater. Sci.-2010.- V. 33, No. 3.- P. 191–196.
24. The influence if electron beam on dielectric properties of ferroelectric BSTO films/ **V.A. Balakin, A.I. Dedik, S.F. Karmanenko, et al** // Pisma JTF.- 2003.- V.29.- P. 77-83.
25. Radiation effects in Thin-film ferroelectric PZT for Non-Voltaile memory Applications in Microelectronics / **J.L. Leray, O. Musseau, P. Paillet, et al** // J. Phys III France.- 1997.- V.7.- P. 1227-1243.
26. **Othon C.M., Ducharme S.** Electron Irradiation Effects on ferroelectric Copolymer Langmuir-Blodgett films // Ferroelectrics.- 2004.- 304.- P. 9-12.

*Received on 11.09.2015.*

*Accepted for publication on 25.11.2015.*

### **ՆՈՒՐԲ ԹԱՂԱՆԹԱՅԻՆ Pt/Ba<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>TiO<sub>3</sub>/Pt ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ I-V ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԸ՝ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ՓՆՁՈՎ ՃԱՌԱԳԱՅԹԵԼԻՍ**

**Վ.Վ. Բունիաթյան, Վ.Ս. Ցականով, Գ.Ս. Կարոյան, Հ.Ռ. Դաշտոյան**

Տեսականորեն հետազոտվել են ֆերոէլեկտրական Pt/Ba<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>TiO<sub>3</sub>/Pt (Pt/BSTO/Pt) բարակ թաղանթային կառուցվածքներում կորստյան հոսանքները, երբ թաղանթը ենթարկվում է էլեկտրոնային փնջի ճառագայթման: Ցույց է տրվել, որ եթե էլեկտրոնային փնջից թթվածնի վականսիաներով պայմանավորված թակարդային մակարդակներում գտնվող էլեկտրոնների կլանած էներգիան մեծ է այդ մակարդակներից հաղորդական գոտի առաքման ակտիվացիայի էներգիայից, ապա տեղի կունենա էլեկտրոնների Շոտկիի արգելքից ջերմա/էլեկտրական և Պոլ-Ֆրենկելյան միաժամանակյա առաքում:

*Առնցքային բաներ.* կորստյան հոսանք, ֆերոէլեկտրիկ, գրավման կենտրոն, Շոտկիի արգելք, Պոլ-Ֆրենկելյան առաքում, թթվածնի վականսիա:

### **I-V ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ Pt/Ba<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>TiO<sub>3</sub>/Pt СТРУКТУР ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА**

**В.В. Буниатян, В.М. Цаканов, Г.С. Кароян, О.Р. Даштоян**

Теоретически исследованы токи утечки в сегнетоэлектрических Pt/Ba<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>TiO<sub>3</sub>/Pt (Pt/BSTO/Pt) тонкопленочных структурах в случае, когда пленка подвергается воздействию электронного луча. Показано, что если от электронного луча поглощенной энергии электронов больше, чем энергии активации эмиссии из ловушечных уровней в зону проводимости, то одновременно происходят пуль-френкельная и температурная/электрическая (из барьера Шоттки) эмиссии электронов.

*Ключевые слова:* ток утечки, сегнетоэлектрик, центр захвата, барьер Шоттки, пуль-френкельная эмиссия, кислородная вакансия.

УДК 519.711

## ИМИТАТОР ДЫХАТЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Н.Д. Езакян, Р.Г. Симонян, А.Г. Гулян

*Институт радиофизики и электроники НАН РА*

Описано устройство, имитирующее все основные функции дыхательного процесса человека, в том числе вдыхание воздуха из окружающей среды и выдыхание нагретых и увлажненных газовых смесей. В устройстве осуществляется отдельная регулировка частоты имитации дыхания, а также длительности процесса вдоха или выдоха. Все параметры имитатора выдаются для калибровки спирометров в виде напряжения постоянного тока, в том числе температура воздуха, частота дыхательного процесса, мгновенное значение скоростей воздушного потока при вдохе и газовых смесей при выдохе. Приведены функциональная схема устройства и основные параметры.

**Ключевые слова:** вдох, выдох, объем, помпа, частота, имитатор, скорость.

**Введение.** Имеется ряд приборов, которые применяются в качестве имитаторов сигналов датчиков. Например, имитатор ИС4101 предназначен для калибровки и поверки каналов измерительных приборов [1,2]. Он формирует на выходе постоянный ток в диапазоне 0,5...19,9 мА при напряжении от 0,5 до 9,99 В. При этом погрешность устанавливаемого значения тока не превышает  $\pm 3\%$ .

Наиболее близким по функциональному назначению можно считать стенд искусственного дыхания СИД-2, который разработан для проверки и тестирования дыхательных аппаратов. Он способен полностью имитировать процесс дыхания в различных условиях окружающей среды [3,4]. Основной составной частью СИД-2 является имитатор дыхания, формирующий поток вдыхаемой и выдыхаемой газовых смесей легочной вентиляции с возможностью измерения дыхательного объема и частоты дыхания. Процесс дыхания имитирует поршневой насос, который приводится в движение асинхронным электродвигателем и управляется электромагнитной муфтой. Управление скоростью поршневого насоса выполняется центробежным регулятором путем скольжения электромагнитной муфты, замыкания или размыкания тока в управляющей цепи. Одним из недостатков системы управления является то, что контроль и измерение частоты дыхания ведутся вручную с помощью секундомера. Управление объемом дыхания осуществляется вручную путем изменения положения регулирующей рукоятки и контролируется по шкале линейки.

Температурно-влажностный режим выдыхаемой газовой смеси имитируют путём нагревания и увлажнения или подсушивания газовой смеси. Нагрев последнего осуществляется электронагревателем, который управляется контактным термометром. В стенде СИД-2 предусмотрено также измерение температуры и влажности вдыхаемой и выдыхаемой газовых смесей. Измерение влажности осуществляется психометрическим способом по показаниям “сухого” и “мокрого” термометров. В качестве датчиков температуры в СИД-2 используется термометрическое сопротивление типа ТСП100. Основным недостатком этих датчиков является значительная инерционность. Ввиду того, что стенд имитирует дыхание человека, инерционность датчиков приводит к недопустимым большим ошибкам, связанным с запаздыванием информации по температуре.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Разработано устройство - имитатор, имитирующее все движения процесса дыхания (вдоха и выдоха) без вышеуказанных недостатков.

При имитации вдоха воздух поступает из окружающей среды, термостабилизируется примерно на уровне температуры лёгких человека, увлажняется и выпускается в целях калибровки. При этом на выходных клеммах прибора формируются напряжения постоянного тока, которые строго пропорциональны времени вдоха и выдоха, частоте дыхания, объёму имитатора лёгких, скорости и температуре воздушного потока при входе или выходе. В приборе обеспечивается отдельная регулировка длительности имитации вдоха и выдоха, частоты имитации дыхательного процесса.

Упрощённая структурная схема разработанного дыхательного имитатора показана на рисунке.

Для управления диафрагменным насосом 1 выходное напряжение источника 2 подаётся к входу 3 линейного преобразователя и одновременно к входу цифрового вольтметра 5, и, следовательно, показание вольтметра пропорционально частоте имитации дыхания (частота движения диафрагмы помпы 1). В имитаторе предусмотрены имитации равномерного движения диафрагмы, а также медленного вдоха и быстрого выдоха (или наоборот) и отдельное управление временем движения имитации вдоха и выдоха. Измеритель амплитудного значения напряжения 6 показывает величину, которая пропорциональна объёму помпы при крайнем положении диафрагмы. Для определения скорости впускаемого и выпускаемого воздушных потоков применяем анемометр постоянной температуры, который можно использовать для измерения как температуры, так и скоростей вдыхаемой и выдыхаемой газовых смесей [5]. Для этого на центральном участке поперечного сечения патрубка 18 прикреплены транзистор 15 и диод 16. Диод работает в прямосмещённом режиме в качестве датчика температуры, транзистор 15 работает в качестве микротермостата, при этом в первом полупериоде работы р-п переход (база - коллектор) транзистора 15 работает в прямосмещённом

режиме в качестве датчика температуры корпуса транзистора, а во втором полупериоде работы переход коллектор-эмиттер работает в режиме нагревателя для установления температуры транзистора. В качестве датчика температуры для термостата на транзисторе 15 служит напряжение, пропорциональное температуре прямосмещённого диода 16 в блоке 14 с увеличением на величину  $\Delta U$ , при этом  $\Delta U = 50 \cdot \Delta U_1$ , где  $\Delta U_1$  - изменение величины напряжения прямосмещённого диода 16 при изменении температуры датчика 16 на  $1^\circ\text{C}$ .

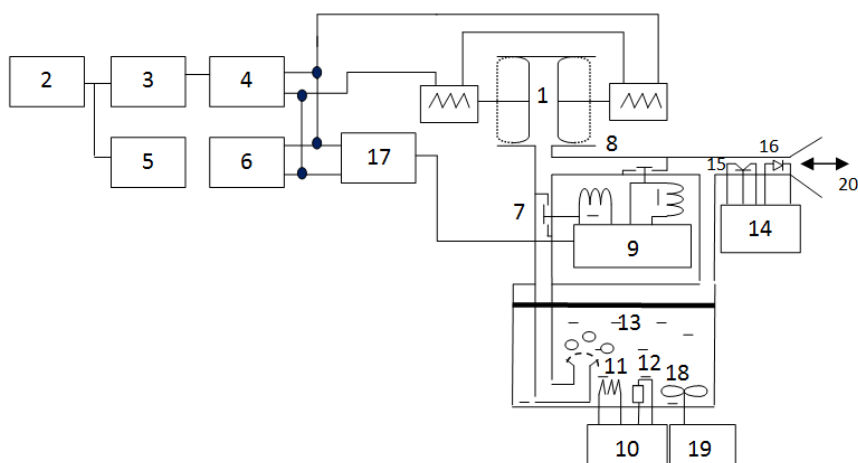


Рис. Структурная схема устройства:

1- диафрагменный насос; 2- управляемый источник постоянного тока; 3- линейный преобразователь напряжение-частота; 4- усилитель мощности; 5- цифровой вольтметр для измерения частоты; 6- цифровой вольтметр для измерения объема помпы 1; 7- клапан впуска воздуха; 8- клапан выпуска воздуха; 9- узел управления клапанами; 10- термостат для стабилизации температуры воды; 11- нагреватель; 12- термодатчик; 13- сосуд, наполненный водой; 14- измеритель скорости газовых потоков; 15- датчик; 16- диод; 17- блок синхронизации диафрагмы с положением клапанов; 18- механическая мешалка; 19- двигатель привода мешалки; 20- патрубок для впуска и выпуска воздуха

Таким образом, перегрев корпуса транзистора – термостата 15 относительно окружающего воздуха составляет  $50^\circ\text{C}$  и поддерживается стабильно при любых величинах измеряемых скоростей потока.

Для увеличения быстродействия измерения скорости потоков и температуры в качестве датчиков использованы бескорпусный диод, при этом время установления температуры составляет не более  $0,2\text{ с}$ . Мощность самонагрева термодатчика  $\leq 8\text{ мкВт}$ .

Устройство работает следующим образом. Перед включением общего питания устанавливается величина напряжения на управляющем частотой дыхания блоке 2 (устанавливаются частота имитации дыхания, длительность

имитации вдоха или выдоха, коэффициент усиления делителя 4 и установка максимального размаха движения диафрагмы). Также включается питание термометра 10 для стабилизации температуры сосуда 13. После установления температуры в сосуде 13 включается общее питание имитатора. Тогда диафрагмы помпы приходят в движение со следующей последовательностью:

1. В полупериоде имитации вдоха диафрагмы помпы 1 отодвигаются, клапан 8 открыт, воздух поступает в междиафрагменное пространство.
2. В полупериоде имитации выдоха клапан 8 закрыт, а клапан 7 открывается, диафрагмы помпы 1 приближаются, а междиафрагменный воздух выдавливается, а из открытого клапана 7 воздух поступает в сосуд 13.

Для нагревания и увлажнения воздух проходит через сетку, превращается в пузырьки, которые поднимаются на поверхность воды сосуда 13. При этом воздушные пузырьки термостабилизируются и увлажняются. После чего этот воздух поступает в выходной – входной патрубков 20 для калибровочных целей.

Таким образом, устройство обеспечивает следующие имитации:

- имитация вдоха: в помпе 1 диафрагмы отодвигаются, клапан 8 открывается, и воздух в патрубке 20 заполняет пространство между диафрагмами помпы 1;
- имитация выдоха: в помпе 1 диафрагмы приближаются, клапан 7 открывается, и воздух через клапан 7 выталкивается в нижнюю часть сосуда 13, в котором, проходя через сетку с отверстиями, в виде пузырьков поднимается до поверхности воды сосуда 13. При этом воздух увлажняется, нагревается примерно до температуры воды сосуда 13.

Во время работы прибора термостат 10 обеспечивает стабильность температуры воды сосуда 13. В приборе формируются сигналы, пропорциональные объёмам и скоростям воздушных потоков в патрубке, температуре и скорости вводимого и выводимого воздуха (при этом нагреватель 11 и термодатчик 12 с механической мешалкой находятся в сосуде 13), частоте дыхания, длительности имитации вдоха и выдоха и т.д.

Разработанный имитатор имеет следующие параметры:

- скорость газовой смеси 0,2 до 0,5 м/с
- максимальный объём воздуха 450 мл
- частота имитации дыхания от 0,1 до 0,5 Гц
- размеры диафрагменной помпы 220\*210\*220 мм<sup>3</sup>
- питание прибора ~220 В, 50 Гц
- температура газовой смеси при имитации выдоха 34,5±0,5С°,
- относительная влажность 95±5%.

**Заключение.** Разработанное устройство имитирует процессы вдоха и выдоха в большом диапазоне частот, обеспечивает требуемую форму процесса вдох-

выдох и, кроме того, выдаёт для калибровки постоянное напряжение, которое пропорционально параметрам дыхательного процесса. Разработанный имитатор может найти широкое применение для калибровки как электронных, так и механических спирометров.

#### Литература

1. <http://pdf.reestr.si.ru/file/18985-99.pdf>,
2. <http://www.tdgears.ru/device/id12166.htm>,
3. [http://ea.donntu.org:8080/jspui/bitstream/123456789/13424/1/Попов\\_Е\\_В.pdf](http://ea.donntu.org:8080/jspui/bitstream/123456789/13424/1/Попов_Е_В.pdf),
4. Руководство по эксплуатации СИД-2.- Донецк, НИИГД, 2006.- 41 с.
5. А.с. 1569719. Устройства для одновременного измерения температуры и скорости потоков / Р.А. Симонян и Д.Э. Торикян.- 1992.

*Поступила в редакцию 26.10.2015.*

*Принята к опубликованию 25.11.2015.*

### ՇՆՀԱՌԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՆՄԱՆԱԿԻՉ

#### Ն.Դ. Եզակյան, Ռ.Հ. Սիմոնյան, Ա.Գ. Դուլյան

Նկարագրված է սարք, որը նմանակում է մարդու շնչառական գործընթացի բոլոր հիմնական ֆունկցիաները, այդ թվում՝ շրջակա օդի ներշնչումը և տաքացրած ու խոնավացրած գազային խառնուրդների արտաշնչումը: Սարքի միջոցով կարգավորվում է շնչառական նմանակման հաճախությունը, առանձին կերպով կարգավորվում են ներշնչման և արտաշնչման գործողությունների տևողությունները: Տրամաչափիչի բոլոր պարամետրերի միջոցով ստուգաչափվում են սպիրոմետրերը՝ հաստատուն հոսանքի լարման տեսքով, այդ թվում՝ օդի ջերմաստիճանը, շնչառական գործընթացի հաճախականությունը, օդային հոսքերի ներշնչման և գազային խառնուրդների արտաշնչման ակնթարթային արագությունները: Տրված են սարքի կառուցվածքային սխեման և հիմնական պարամետրերը:

**Առանցքային բաներ.** ներշնչում, արտաշնչում, ծավալ, պոմպ, հաճախություն, տրամաչափիչ, արագություն:

### A SIMULATOR OF RESPIRATORY PARAMETERS

#### N.D. Yezakyan, R.H. Simonyan, A.G. Ghulyan

A device, simulating all the basic functions of the respiratory process of a human, including inhalation of ambient air and exhalation of heated and humidified gas mixtures is described. The frequency of simulated breathing is regulated in the device, the length of inhalation and exhalation are regulated separately. All the parameters of the simulator are issued for calibrating the spirometers as a DC voltage, including the air temperature, the breathing process frequency, and the instantaneous speed of the airflow at inhalation, and the gas mixtures at exhalation. The functional diagram of the device and the main parameters are given.

**Keywords:** inhalation, exhalation, volume, pump, frequency, simulator, speed.

УДК 524.35

## РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ СИМПТОМОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

А.Г. Гулян, Г.А. Пирумян, Г.С. Аветисян

*Институт радиофизики и электроники НАН РА*

Рассмотрены структура и технические характеристики системы вертикального зондирования ионосферы на длине волны  $\lambda = 4,2$  м. Изучены возможности улучшения чувствительности интерференционного радиотелескопа методом цифровой обработки данных наблюдений с целью исследования оценки симптомов сейсмической опасности. Представлены программа и методика наблюдений, а также практические реализации узкополосной частотной и степенной фильтрации интерференционной гармоника. Анализ результатов наблюдений подтвердил корреляцию между сейсмическими явлениями и поглощением ионосферой радиоизлучения природных космических источников в период подготовки к землетрясению магнитудой  $M \geq 4$ .

**Ключевые слова:** ионосфера, радиотелескоп, интерференционная гармоника, цифровой анализ.

**Введение.** Оценка сейсмической опасности осуществляется путем непрерывной регистрации разных (электромагнитного, геомагнитного, ионосферного и т.д.) симптомов в зоне опасности. В ряде работ [1-4] предложены модели возбужденной ионосферы в связи с аномальным нарастанием литосферно-ионосферного взаимодействия. В отличие от наклонного зондирования, радиоастрономический способ вертикального зондирования ионосферы однозначно охватывает зону подготовки землетрясения, все слои ионосферы и благодаря чувствительному радиотелескопу обладает высокой информативностью. С этой целью в Институте радиофизики и электроники НАН Армении был разработан, изготовлен и в научном полигоне установлен интерференционный радиотелескоп в диапазоне волны  $\lambda = 4,2$  м, на котором проводятся продолжительные наблюдения галактического фона и некоторых точечных космических радиоисточников (Кассиопея-А, Лебедь-А), кульминирующих вблизи зенита. Ниже приведены структура и технические параметры радиотелескопа, а также дан анализ результатов наблюдений.

**Радиотелескоп.** Антенна радиотелескопа - полноповоротное плоское зеркало с линейными размерами  $4\lambda \times 1,5\lambda$ , состоящее из двенадцати равномерно распределенных синфазно возбужденных волновых диполей (рис.1),

столбики которых соединяются кабелями с электрическими длинами  $\lambda/2$ , а волновые сопротивления отдельных диполей ( $R \approx 900 \text{ Ом}$ ) рассчитаны из условия согласования. Выход антенны через симметрирующий узел подается к радиометру. Для осуществления радиоинтерферометрии при регистрации слабых точечных космических радиоисточников над уровнем галактического фона на территории полигона было установлено второе зеркало (один столб основного зеркала). Параметры антенны (табл.) определялись радиоастрономическим методом с помощью радиоисточников Кассиопея-А и Лебедь-А.

Таблица

Параметр	$A_{эфф}$	$\varphi_3 \text{ дБ}$	$\Theta_3 \text{ дБ}$	$f_0$	$\Delta f$	$K_{vc}$	$F_{ш}$
Величина	$50 \text{ м}^2$	$40^\circ$	$15^\circ$	$72 \text{ МГц}$	$400 \text{ кГц}$	$70 \text{ дБ}$	$\geq 2.5$

Радиометр, структурная схема которого приведена на рис. 2, представляет собой супергетеродинную систему прямого преобразования со входным малошумящим усилителем, в которой с целью отстранения от помех предусмотрена девиация рабочей частоты в пределах  $1 \text{ МГц}$ .

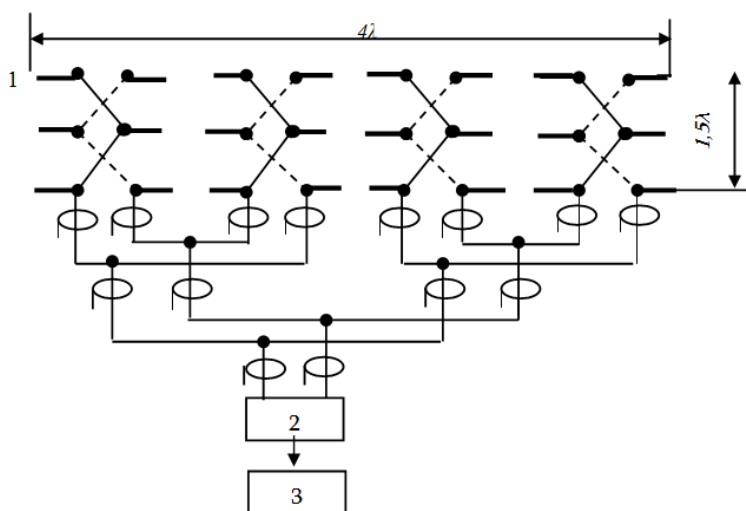


Рис. 1. Структурная схема антенны:  
1 - антенна, 2 - симметрирующий узел, 3 - радиометр

**Программа и методика наблюдения.** Учитывая тот факт, что плотности потоков радиоисточников Кассиопея-А и Лебедь-А известны с большой точностью, и они кульминируют вблизи зенита, где галактический фон интенсивнее, для наблюдений была выбрана прилегающая область небосвода. Наблюдения проводились ежедневно с девятичасовой продолжительностью,

достаточной для прохождения обоих источников через диаграмму направленности неподвижного радиотелескопа, в интервале  $17^h 30^m \leq \alpha \leq 26^h 30^m$  прямого восхождения источника. Совместная регистрация радиоизлучения галактического фона и дискретных радиоисточников осуществлялась и в аналоговом виде – на ленте самописца, и в виде цифрового ряда - в памяти компьютера. С целью улучшения чувствительности системы осуществлялись методы цифрового анализа данных наблюдения.

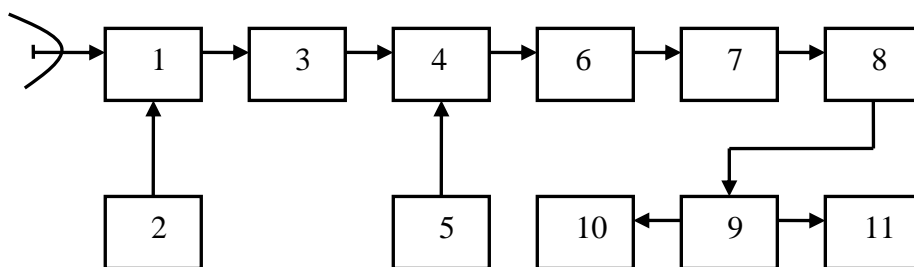


Рис. 2. Структурная схема радиометра:

1 - антенный переключатель, 2 - генератор шума, 3 - малошумящий усилитель, 4 - смеситель, 5 - гетеродин, 6 - усилитель промежуточной частоты, 7 - детектор, 8 - усилитель постоянного тока, 9 - накопитель, 10 - компьютер, 11 - самописец

**Узкополосная частотная фильтрация интерференционной гармоник (ИГ).** Метод практически реализовался на примере наблюдения космического радиоисточника Телец-А на длине волны  $\lambda=4,2$  м с помощью радиоинтерферометра ИРФЭ с базой  $D=15 \lambda$  и эффективной поверхностью антенн  $50 \text{ м}^2$  и  $10 \text{ м}^2$ . Полный аналоговый сигнал (радиоисточника, галактического фона и шумов), зарегистрированный на выходе радиометра (рис. 3а) оцифровывался 10-разрядным аналого-цифровым преобразователем с временным разрешением  $0,01 \text{ с}$  и вводился в компьютер в виде последовательной записи данных в отдельный иницируемый текстовый файл. По второму параллельному каналу записывались метки времени. Такая регистрация позволяла с большой степенью точности учитывать фазовый сдвиг при последующей обработке результатов измерений. Дальнейшая обработка данных производилась с помощью программы “Origin-6”, которая имеет встроенные функции Фурье-анализа, расширенные математические возможности для построения узкополосных цифровых фильтров, настраиваемых на частоту гармоник. Процесс цифровой частотной фильтрации происходит по следующей примерной схеме. Из зарегистрированного после детектора аналогового сигнала (рис. 3а) с помощью полинома N-й степени выделяется фоновое излучение, которое затем вычитывается. Далее для ИГ источника строится частотный спектр мощности и определяются параметры полосового фильтра  $F$  и  $\Delta F$ .

Результаты цифровой фильтрации дали возможность выявить слабый полезный сигнал на фоне шумов и радиопомех. Почти незаметная интерференционная гармоника радиостанции Телец-А после цифровой фильтрации четко выделяется на уровне несравненно более сильного фонового излучения Галактики, шумов и помех (рис. 3б). Даже далекие от центра боковые лепестки ИГ, которые вообще не заметны до фильтрации, тоже хорошо выделяются.

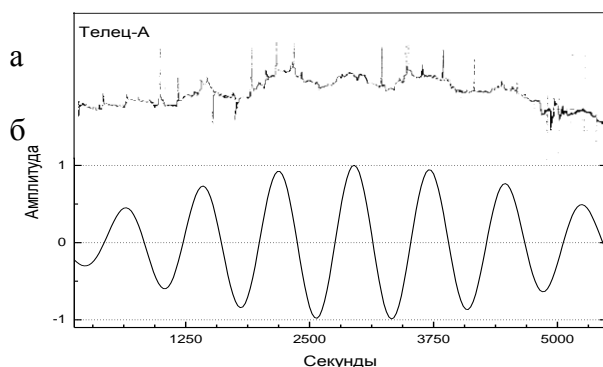


Рис. 3. ИГ радиостанции Телец-А до (а) и после (б) цифрового узкополосного частотного фильтра

Это свидетельствует о том, что радиостанции, имеющие на порядок меньшую интенсивность, чем Телец-А, можно наблюдать с помощью радиоинтерферометров, имеющих малые эффективные площади антенн.

**Степенная фильтрация.** Степенной цифровой фильтр усиливает переменную составляющую зарегистрированного после детектора сигнала космического радиостанции, в данном случае - его пространственную гармонику. При этом чем больше ее амплитуда, тем больше она усиливается, соответственно улучшается избирательность системы.

Представим интерферированную запись космического излучения (сигнал дискретного источника, галактического фона и шумов) в виде цифровой последовательности во времени и введем ее в память ЭВМ. Умножим каждый член  $P(t)$  последовательности  $P_i(t)$  соответственно на степенной множитель,

например  $\exp - \left\{ \frac{P_m - P_i(t)}{P_m} \right\}$  (в качестве основания можно взять любое целое

число), и запишем ее в виде новой последовательности во времени:

$P(t) = P_i(t) \exp - \left\{ \frac{P_m - P_i(t)}{P_m} \right\}$ , где  $P_m$  - член последовательности  $P_i(t)$  с максималь-

ным значением.

Очевидно, что в результате такого преобразования получится отфильтрованное значение переменной составляющей последовательности. Это хорошо видно на примере фильтрации интерференционной записи сигнала радиостанции Лебедь-А (рис. 4б), который, как известно, находится в области сильного фонового галактического излучения (рис. 4а)

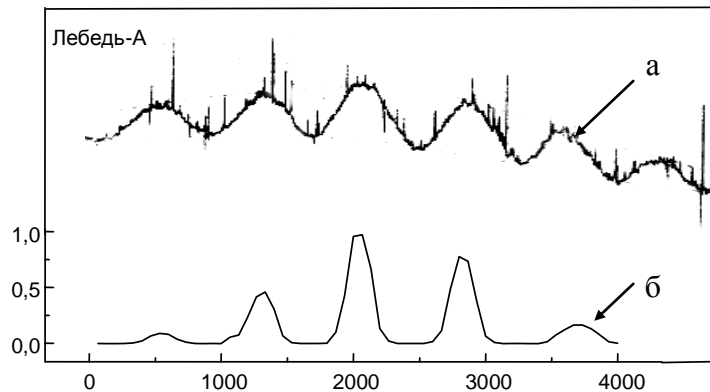


Рис. 4. ИГ радиостанции Лебедь-А до (а) и после (б) степенного цифрового фильтра

**Результаты исследования.** Графические изображения обработанных результатов наблюдений приведены на рис. 5-7. На рис. 5 стрелкой изображена аномалия временного ряда наблюдений дискретного радиостанции Лебедь-А перед Гандзакским землетрясением (Азербайджан, 25.03.2015г.,  $M \approx 3,5$ ). На рис. 6, 7 приведены нормальный и аномальный временные ряды радиостанций Кассиопея-А и Лебедь-А до Степанаванского землетрясения (Армения, 24.03.2015,  $M \approx 3,7$ ).

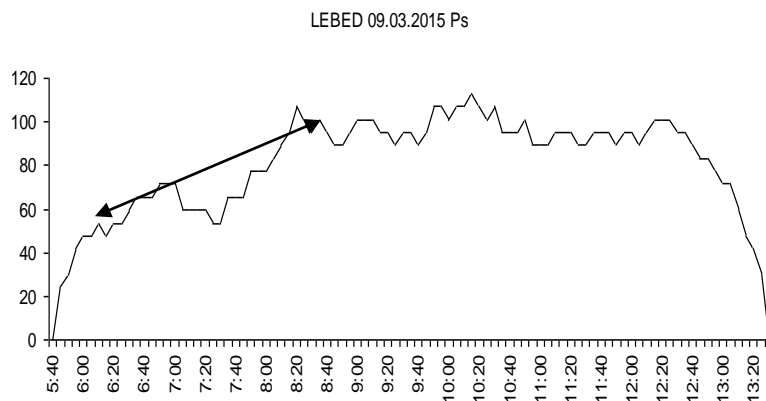


Рис. 5. Временной ряд наблюдения радиостанции Лебедь-А (09.03.2015г., Шуши, НКР)



Рис. 6. Временной ряд наблюдения радиоисточников Лебедь-А и Кассиопея-А без аномалии (16.03.2015г., Сараванд)

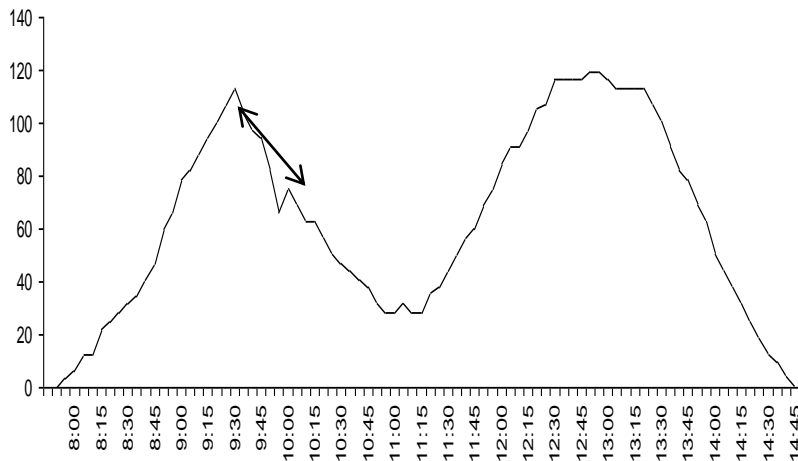


Рис.7. Временной ряд наблюдения радиоисточников Лебедь-А и Кассиопея-А с аномалией (17.03.2015г., Сараванд)

**Выводы.** Результаты ежедневных, длительных наблюдений, малая часть которых представлена на рис. 5-7, подтверждают факт измеримой корреляции между фазой подготовки землетрясения и поглощением радиоизлучения в возбужденной ионосфере, что можно объяснить ухудшением радиопрозрачности ионосферы, обусловленным электромагнитным излучением деформированного грунта в зоне землетрясения. Полученные обнадеживающие результаты обосновывают необходимость проведения дальнейших

исследований сейсмоионосферных связей и применения радиоастрономического метода вертикального зондирования.

#### Литература

1. **Balasanian S.** Dynamic Geo- electricity. –Novosibirsk: NAUKA, Siberian department, 1990.- 232 p.
2. **Barsukov O.** Analysis Method for Seismoelectromagnetic Processes.– M.: Nauka, 1991.- 56 p.
3. **Kamke E.** Referense Book for Ordinary Differential Equations.- M.: Nauka, 1965.- 454 p.
4. Remote sensing system of ionosphere for assessment of seismic risks / **R. Martirosyan, A. Goulyan, et al** // Izv. NAN RA, Ser. TH.- 2006.- LIX, N3.- P. 609-614.

*Поступила в редакцию 09.10.2015*

*Принята к опубликованию 25.11.2015.*

### ՍԵՅՍՄԻԿԱԿԱՆ ՆԱԽԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ ՌԱԴԻՈԱՍՏՐՈՄԻԱԿԻ ՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳ

**Ա.Գ. Դուլյան, Հ.Ա. Փիրումյան, Գ.Ս. Ավետիսյան**

Դիտարկված են իոնոլորտի ուղղահայաց զոնդավորման  $\lambda = 4,2$  մ ալիքի երկարության տիրույթի համակարգի կառուցվածքը և տեխնիկական բնութագրերը, ինչպես նաև սեյսմիկական նախանշանների գնահատման նպատակով դիտումների տվյալների թվանշային եղանակով մշակմամբ ինտերֆերենցիոն ռադիոդիտակի զգայնության մեծացման հնարավորությունները: Ներկայացված են դիտումների ծրագիրը, մեթոդը, ինչպես նաև ինտերֆերենցիոն հարմոնիկի նեղշերտ հաճախային և աստիճանային զտումների իրականացումները: Դիտումների արդյունքների վերլուծությունը հաստատել է փոխկապակցություն  $M \leq 4$  մագնիտուդով երկրաշարժերի նախապատրաստման փուլում սեյսմիկական երևույթների և իոնոլորտի կողմից կոսմիկական աղբյուրների ռադիոհաճախային կլանման միջև:

**Առանցքային բաներ.** իոնոլորտ, ռադիոդիտակ, ինտերֆերենցիոն հարմոնիկ, թվանշային վերլուծություն:

#### A RADIO ASTRONOMY SYSTEM FOR ESTIMATING SEISMIC HAZARDS

**A.G. Ghulyan, H.A. Pirumyan, G.S. Avetisyan**

The structure and system specifications of vertical sounding of the ionosphere at a wavelength of  $\lambda = 4,2$  m, and the opportunities to improve the sensitivity of the interference of the radio telescope with digital data observations to study the seismic hazard assessment symptoms are considered. The analysis of the observation results has confirmed the correlation between the seismic phenomena and the absorption of radio waves by the ionosphere natural cosmic sources while preparing to face earthquakes of a magnitude of  $M \leq 4$ .

**Keywords:** ionosphere, radio telescope, the interference harmonica, digital analysis.

УДК 621.396.677.8

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ФОКАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

Н.С. Мужикян<sup>1</sup>, А.С. Саргсян<sup>2</sup>

<sup>1</sup>"IOX ENGINEERING" LLC

<sup>2</sup> Национальный политехнический университет Армении

Проведено исследование электромагнитного поля в фокальной области двухзеркальной сферической антенны. Получены формулы, позволяющие определить влияние изменения положений составных частей антенны (большого сферического зеркала, малого зеркала, облучателя, несущей конструкции "хобота") на диаграмму направленности (ДН). Выведена формула фазового распределения в фокальной области антенны РОТ-54/2.6. В среде программирования LabVIEW разработано программное обеспечение, которое выполняет расчет угла отклонения и представляет результаты в виде графиков.

**Ключевые слова:** антенна, диаграмма направленности, фазовое распределение, угол отклонения, среда программирования LabVIEW.

**Введение.** Некоторые вопросы, связанные с инженерными расчетами двухзеркальных антенн больших радиотелескопов, еще в начале 60-х годов разработал академик Парис Мисакович Геруни. В Армении на южном склоне горы Арагац, на высоте 1700 м над уровнем моря был построен радиооптический телескоп РОТ-54/2.6. Главная ось 54-метровой двухзеркальной сферической антенны объединена с осью большого оптического телескопа [1]. В настоящее время радиотелескоп законсервирован, но ведется поиск наиболее приемлемых решений по его модернизации и вводу в строй, что может сыграть важную роль для развития радиоастрономии и сверхдальней космической связи как для Армении, так и для мирового научно-технического сообщества. В нем скрыты большие возможности для формирования и коррекции ДН антенны, на базе антенны радиотелескопа возможно создание многолучевой реконфигурируемой антенной системы.

**Постановка задачи и обоснование методики.** Известно, что классические схемы больших полноповоротных параболических антенн не соответствуют современным требованиям антенной техники из-за деформируемости структуры, что обусловлено изменением температуры, ветром и воздействием других факторов, а также перераспределением собственного веса во время

вращения антенны. Успешным решением проблемы является создание двухзеркальной сферической антенны с неподвижным большим зеркалом. Движение луча в пространстве выполняется при помощи перемещения малого зеркала, имеющего специальную форму, относительно центра неподвижного сферического зеркала. Кроме того, данный тип антенн имеет ряд преимуществ: высокая точность, большой коэффициент использования поверхности (КИП), низкий уровень собственных шумов и т.д. Высокое значение КИП достигается возможностью получения почти равномерного амплитудного распределения в раскрыве антенны. Кроме того, двухзеркальные сферические антенны являются низкошумящими и помехоустойчивыми системами. В этом смысле их можно назвать антеннами “без краев”.

В настоящей работе исследовано электромагнитное поле в двухзеркальной сферической антенне, точнее - в ее фокальной области, т.е. в раскрыве малого зеркала, что позволяет определить изменения ДН, когда одна из составных частей антенны подвергается механической деформации, связанной с перемещением. В ходе исследования разработано программное обеспечение в среде программирования LabVIEW, которое позволяет, имея параметры антенны, получить угловое отклонение ДН. Блок-диаграмма программы приведена на рис. 1.

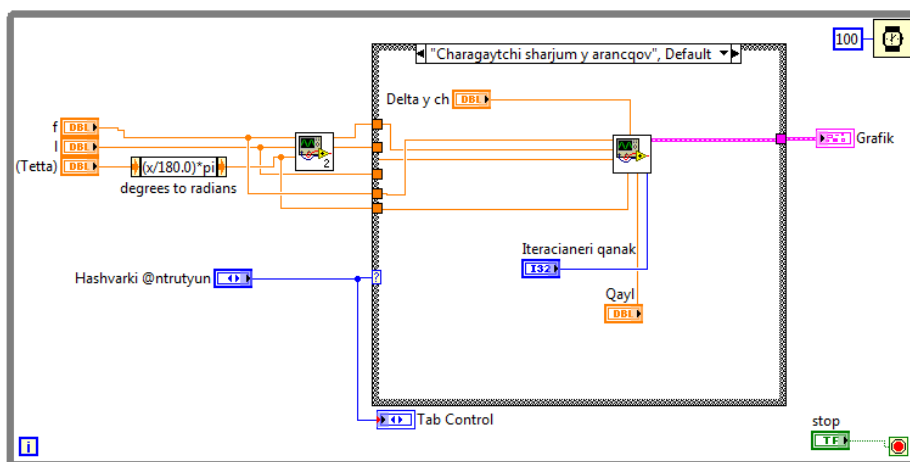


Рис. 1. Блок-схема программной модели расчета угла отклонения двухзеркальной сферической антенны

**Результаты исследования.** Исходя из того, что фазовое распределение играет важную роль, при расчетах деформации составных частей антенны, связанной с перемещением, получена формула фазового распределения в фокальной области (см. рис. 2) [2,3]:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [(\cos \theta + \sqrt{(\cos \theta - f)^2 + (\sin \theta - y)^2}) - (2 - f)],$$

$$y = \sin \theta - (\cos \theta - f) \operatorname{tg} 2\theta,$$

откуда получается

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \left( \cos \theta + \sqrt{(\cos \theta - f)^2 + (\operatorname{tg} 2\theta (\cos \theta - f))^2} \right) - (2 - f) \right]. \quad (1)$$

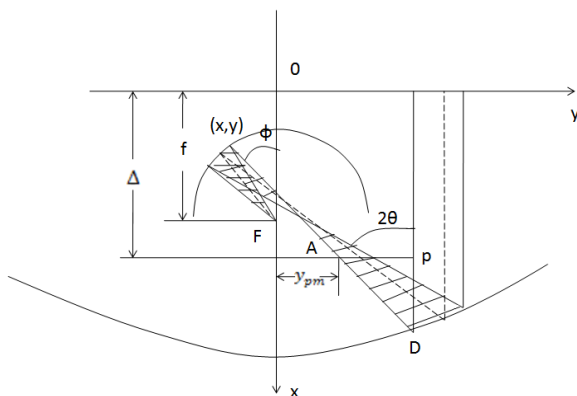


Рис. 2. Оптическая схема двухзеркальной сферической антенны

Все приведенные в данной работе формулы и графики были получены, используя законы геометрической оптики. Основываясь на результатах соответствующих работ [4], сделан расчет угла отклонения луча и в среде программирования LabVIEW разработан специальный алгоритм расчета. На фронтальной панели программы с помощью выпадающего меню имеется возможность выбрать соответствующую часть расчета и перейти к данной части. Параметрам в каждой части даются соответствующие значения, и нажатием кнопки “run” программа начинает работу (выполняются расчеты и строятся графики зависимостей углов отклонения ДН антенны из-за соответствующей деформации). На рис. 3 изображена панель управления программой расчета угла отклонения при отклонении облучателя по осям  $y$  и  $x$ . Графики были построены по формулам (2) и (3), приведенным ниже [2-4].

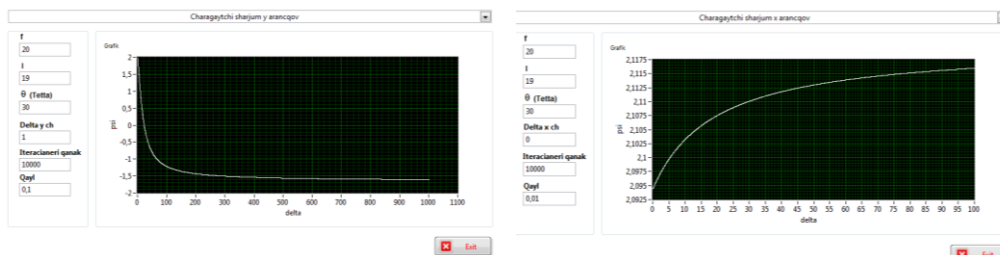


Рис. 3. Угол отклонения в зависимости от отклонения облучателя по осям  $y$  и  $x$

На рис. 4 изображена панель управления программой расчета угла отклонения при отклонении малого зеркала по осям  $y$  и  $x$ . Графики были построены исходя из нижеприведенных формул (4) и (5) [2-4].

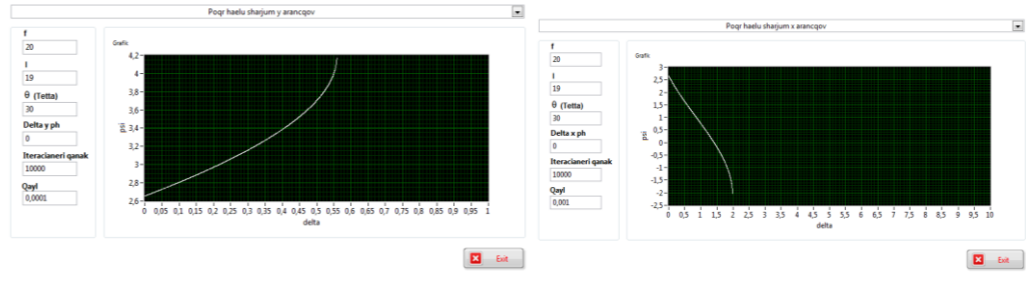


Рис. 4. Угол отклонения в зависимости от отклонения малого зеркала по осям  $y$  и  $x$

На рис. 5 изображена панель управления программой расчета угла отклонения при повороте малого зеркала вокруг своей оси. График был построен, используя формулу (6) [2-4].

Чтобы получить непрерывный график, нужно взять примерно 10000 точек, а шаг - примерно 1 градус (как приведено на рис. 5).

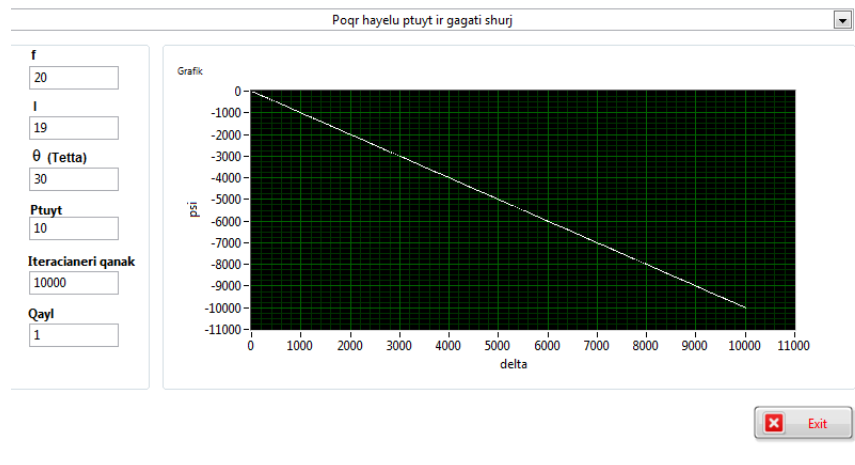


Рис. 5. Угол отклонения в зависимости от поворота малого зеркала вокруг своей оси

На рис. 6 изображена панель управления программой расчета угла отклонения в зависимости от смещения центра и радиуса сферы. График был построен, используя формулу (7) [2-4].

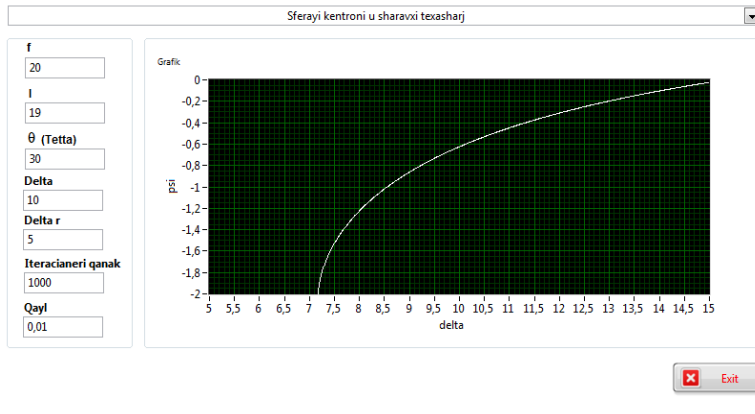


Рис. 6. Угол отклонения при смещении центра и радиуса сферы

На рис.7 изображена панель управления программой расчета угла отклонения в зависимости от удлинения несущего хобота. График был построен, используя формулу (8) [2-4].

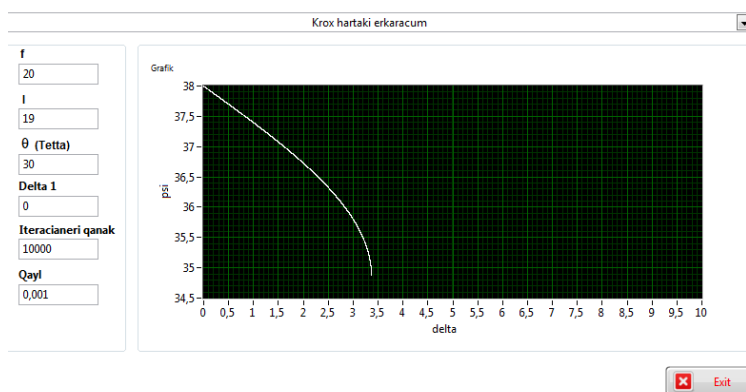


Рис. 7. Угол отклонения в зависимости от удлинения несущего хобота

Приведены формулы определения угла отклонения [3] соответственно при перемещении облучателя по осям  $y$  (2) и  $x$  (3), перемещении малого зеркала по осям  $y$  (4) и  $x$  (5), повороте малого зеркала вокруг своей оси (6), смещении центра и радиуса сферы (7) и удлинении несущего хобота (8):

$$\psi = \arctg \frac{f-|x|}{y+\delta y} - \arctg \frac{f-|x|}{y} + 2\theta - 2\varphi, \quad (2)$$

$$\psi = 2\theta + \arctg \frac{f+\delta x-|x|}{y} - \arctg \frac{f-|x|}{y} - 2\varphi, \quad (3)$$

$$\psi = 2\theta - 2 \arcsin(x \sin 2\theta - (y + \Delta y) \cos 2\theta), \quad (4)$$

$$\psi = 2\theta - 2 \arcsin((x + \Delta x) \sin 2\theta - y \cos 2\theta), \quad (5)$$

$$\psi = 2\theta - \alpha - 2 \arcsin(x \cos \alpha - y \sin \alpha + l(1 - \cos \alpha) \sin(2\theta - \alpha) + (x \sin \alpha + y \cos \alpha - l \sin \alpha) \cos(2\theta - \alpha)), \quad (6)$$

$$\psi = 2\theta - 2 \arcsin \frac{(x \pm \delta) \sin 2\theta + y \cos 2\theta}{(1 + \delta_r)}, \quad (7)$$

$$\psi = 2\theta - 2 \arcsin((x + \delta_1) \sin 2\theta - y \cos 2\theta), \quad (8)$$

где  $\psi$  – угол отклонения;  $\theta$  и  $\varphi$  – угол падения и угол отражения на большое зеркало соответственно до и после перемещения;  $x$  и  $y$  – координаты малого зеркала;  $\delta_y$  и  $\delta_x$  – отклонение облучателя соответственно по осям  $y$  и  $x$ ;  $\Delta y$  и  $\Delta x$  – отклонение малого зеркала соответственно по осям  $y$  и  $x$ ;  $\alpha$  – угол поворота малого зеркала вокруг своей оси;  $\delta_r$  и  $\delta$  – смещение центра и радиуса сферы соответственно;  $\delta_1$  – удлинение несущего хобота.

Приведенные формулы (2)-(8) были использованы для создания программного обеспечения.

**Заключение.** Из полученных результатов можно сделать вывод, что перемещение составных частей антенны приводит к определенному отклонению ДН от главного направления, которое можно оценить. Из графиков, полученных в результате работы, можно увидеть, что отклонение луча происходит по-разному в случаях различных механических деформаций. При перемещении облучателя вдоль оси  $y$  угол отклонения в зависимости от степени перемещения происходит по экспоненциальному закону; при перемещении по оси  $x$  – по параболическому закону, что очень похоже на случаи смещения центра сферы. В случаях перемещения малого зеркала по оси  $x$  и при удлинении несущего хобота зависимость от степени перемещения происходит по одному и тому же параболическому закону, что очевидно из формул (5) и (7). И наконец, изменение угла отклонения в зависимости от угла поворота малого зеркала вокруг своей оси происходит по линейному закону. Следует отметить, что модернизация с целью эксплуатации уже имеющегося научно-технического инструмента намного проще, чем создание нового. Именно поэтому в Государственном комитете по науке Министерства образования и науки Республики Армения создан специальный комитет, занимающийся вопросами запуска антенны РОТ-54/2.6. Настоящая работа посвящена теоретической поддержке первого этапа модернизации: юстировке антенны.

## Литература

1. А. с. № 1377941 (СССР). Зеркальный радиотелескоп Геруни / П.М. Геруни. – 1986.
2. Бахрах Л.Д., Галимов Г.К. Зеркальные сканирующие антенны. - М.: Наука, 1981. – 302 с.

3. Отчет ВНИИРИ по теме 12.03.22.04 “Разработка методики измерения параметров больших многозеркальных антенн по полю в раскрыве малого зеркала”. – Ереван, 1971.
4. Отчет ВНИИРИ по теме 12.03.22.02 “Разработка теории и методики электродинамического расчета точностей и допусков на установку элементов двух- и многозеркальных антенн”. – Ереван, 1971.

*Поступила в редакцию 17.06.2015.  
Принята к опубликованию 25.11.2015.*

**ԵՐԿՎԱՅԵԼԻ ԱՖԵՐԻԿ ԱՆՏԵՆԱՅԻ ԿԻՉԱԿԵՏԱՅԻՆ ՏԻՐՈՒՅԹՈՒՄ  
ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ**

**Ն.Ս. Մուժիկյան, Ա.Ս.Սարգսյան**

Կատարվել են հաշվարկներ, և ստացվել են բանաձևեր, որոնք թույլ են տալիս գտնել երկհայելի սֆերիկ անտենայի բաղադրիչ մասերի (մեծ հայելու՝ սֆերայի, փոքր հայելու, ճառագայթի, կրող մեխանիզմի «կնճիթ») դիրքերի փոփոխության ազդեցությունը անտենայի ուղղվածության դիագրամի (ՌԻԴ) ճառագայթի վրա: Ստացվել է ՌՕԴ-54/2.6 անտենայի կիզակետային տիրույթում փուլային բաշխվածության բանաձևը, ինչպես նաև LabVIEW միջավայրում մշակվել են անկյունային շեղման հաշվարկը և գրաֆիկական տեսքով արդյունքները ներկայացնող ծրագիրը:

**Առանցքային բառեր.** անտենա, ուղղվածության դիագրամ (ՌԻԴ), փուլային բաշխվածություն, շեղման անկյուն, LabVIEW ծրագրային միջավայր:

**INVESTIGATING THE ELECTROMAGNETIC FIELD IN THE FOCAL REGION OF  
DOUBLE-REFLECTOR SPHERICAL ANTENNA**

**N.S. Muzhikyan, A.S. Sargsyan**

Formulae allowing to find the impact of the position changes of the antenna's components (big spherical mirror, secondary mirror, feed, bearing structure) on the antenna pattern are obtained. A formula of phase distribution in the focal region of the ROT-54/2.6 antenna is derived, as well as a software in the LabVIEW programming environment, calculating the deflection angle and presenting the results in graphical forms is developed.

**Keywords:** antenna, pattern, phase distribution, deflection angle, LabVIEW programming.

UDC 621.382

## PHOTOCURRENT ANALYSIS IN SECURITY AND SAFETY SYSTEMS

**S.H. Tsaturyan**

*National Polytechnic University of Armenia*

A new approach to using selectively sensitive sensors (photodiode) for detection and identification of mixed substances has been studied. The studied application is the optical photocurrent analysis for identification and quantification of mixtures in natural objects with calculation capability of quantitative data (the spectral sensing range of 230...1000 nm). In this work, a new portable photospectrometer concept has been designed which is using a selectively sensitive sensor and makes the device to be low-cost and multipurpose.

**Keywords:** photocurrent, photodiode, photodetector, algorithm, spectral analysis, safety, drugs, explosives.

**Introduction.** Contactless photospectrometry of mixed substances means the identification and quantity measurement of the substance(s) in natural objects at a distance. Detection and assessment of dangerous substances is one of the important aspects of this study. Therefore, development of primary sensors allowing to provide a spectral analysis of the electromagnetic waves emitted from the object is of utmost importance today.

Especially important is the research and development of a selectively sensitive sensor capable of sensing in different environments [1, 2].

Currently, such analysis of the electromagnetic radiation spectral distribution is obtained using light filters, prisms with high precision mechanical devices and diffraction grids [3]. The spectrophotometric systems that are available in the market using the listed methods are limited in flexibility of adding new features, as additional devices are required and external computer software modifications are needed. These factors are making the system expensive and limiting its use in the field.

Besides, these methods of analysis are accompanied by data destruction, in quantitative and qualitative aspects. The credibility of the results depends directly on the parameters of the equipment used and requires improvements of measurement devices, and the development of rational methods for the analysis of experimental results. Moreover, the more information is received, the more complicated becomes

the interpretation of measurement results, requiring the development of new signal processing methods and new algorithms for massive data processing [4].

An attractive way to solve this issues is to:

- Design a new silicon based sensor (semiconductor structure), capable of providing accurate spectral sensing of electromagnetic radiation;
- Design a data acquisition and signal processing unit;
- Develop a complex algorithm for data analysis and data visualization.

The existing investigations of multicolored photo detectors [5, 6] used cascade multi-layer structures with various thickness active layer bases. In these, different depths of penetration of the beam provides different sizes of photoconductivity. The mathematical processing of measurement results provides information on the spectral intensity distribution. Theregistration accuracy in such structures strictly depends on the absorption condition identity and necessity of developing nanoscale multilayer structures with numerous photodiodes. The obtained sophisticated technology and the impossibility to control the spectral sensitivity complicates their manufacturing and makes them non-usable for the multifunctional and multipurpose applications [7, 8].

**Objectives.** It is significantly important to design and develop new methods of identification of dangerous substances in distance. The primary goal of this study is aimed at developing a technology which could be used to create security and safety solution for the dangerous substances identification with high accuracy and high performance.

This solution should be able to solve the photocurrent analysis problems and be easily integrated in general and multipurpose monitoring systems, such as food or drug inspection, security check for the explosives, etc. The achieved spectral sensitivity should be in the range of 230...1000 nm.

This will allow the security or operational personnel to use the device to remotely identify, quantitatively analyze and mark the contaminants contained in this spectral range in natural objects, and classify the results by multiple patterns stored in the database.

This technology and method could be used and extended for other safety, security or inspection-related application.

**Methods of research.** This study proposes to research a remote explosive identification and monitoring system with a sensor that registers the information. The sensor is a semiconductor structure with two back-to-back p-n junctions (p + -n-p + -), in which the n – area is the base. The base is occupied by the p<sup>+</sup> - n and n - p<sup>+</sup> depleted barrier layers (Fig. 1). By the manipulation of external voltage, the point of contact of the depleted layers x<sub>m</sub> can be moved towards the photosensitive surface.

The electromagnetic wave absorption is depicted in Fig. 2.

The  $p^+ - n$  junction is biased positively, and the  $n - p^+$  junction - negatively. The photocurrent is generated in the base ( $d - x_m$ ) segment of the structure. The photocharges generated in the range of 0 to  $x_m$  are reunified and because of that they are not moving to the external circuit and not creating photocurrent.

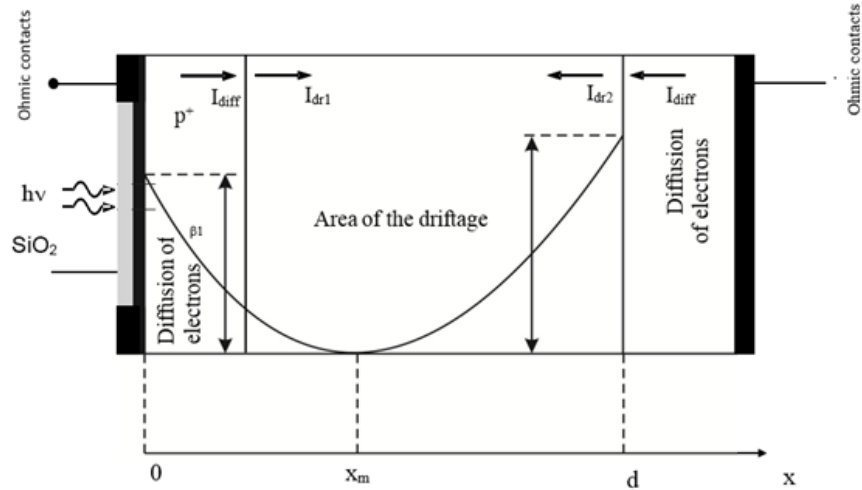


Fig. 1.  $p^+ - n - p^+$  semiconductor structure

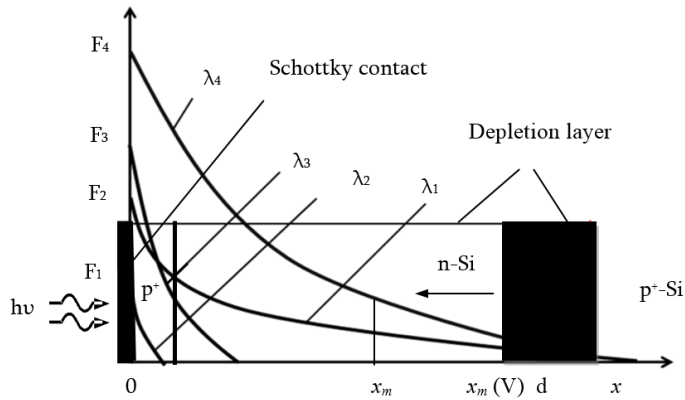


Fig. 2. The curves of different waves' absorption in semiconductor structure,  $F$  is the radiation intensity

By the application of external voltage,  $x_m$  is moved to the surface, in the direction of 0 (Fig. 2), thus the photocurrent range includes the absorption of new wavelengths, resulting in the change of photocurrent. It is known that, the shorter the wavelength, the smaller is the absorption depth. However, in an integral radiation flux, it is often

possible that, for a given  $x_m$ , a high intensity short wavelength may have a higher intensity residual amplitude compared with lower intensity but longer wavelength.

In these conditions, there are multiple uncertainties at different depths, and because of this, the resulting photo signal is mainly due to the two high intensity wavelengths. Therefore, for two different close values of  $x_m$ , the corresponding total photo signal waveform correlation would be conditioned by that wavelength. Moreover, the bigger is the contribution of that Particular wavelength on the waveform photocurrent, and depending on how close these two  $x_m$  values are, it would be much more accurate [9].

Registration difficulties during the wave recognition could be easily managed if the objects are investigated under the radiation of Tungsten filament lamp. The intensities of wavelengths are increasing in parallel to the increase of wavelengths.

Thus, moving from the depth to the surface in photodetector's registration environment, the registration of the waves will be executed sequentially from long to short waves. This gives us an opportunity to develop an algorithm capable of differentiating the photocurrent of a particular wave from the total generated photocurrent and, based on that effect, to recognize the absorption material and the absorption portion, which will be the quantities value of the material.

The following equations contain parameter-specific relations for modeling the physical processes in researched structures. The specified parameters are correlated: the electron's potential energy minimum-point position in the base, photons full flow -  $F_0$ , base width -  $d$ , absorption ratio -  $\alpha$ , deviation voltage -  $V$ , photocharges density [10].

P-zone, diffusion current,

$$I_{\text{diff}} = SqF_0 \frac{\alpha L_n}{1 + \alpha w} e^{-\alpha d}. \quad (1)$$

In this work, the expressions for drift currents formed in the base of such structures are obtained:

$$I_{dr1} = qF_0 S (1 - e^{-\alpha x_m}), \quad (2)$$

$$I_{dr2} = qF_0 S (e^{-\alpha x_m} - e^{-\alpha d}). \quad (3)$$

Photocurrent produced by integral radiation is:

$$\begin{aligned} \sum_{i,j} I_{Ph\ i,j} &= \sum_{i,j} I_{dr1\ i,j} - \sum_{i,j} I_{dr2\ i,j} - \sum_{i,j} I_{diff\ i,j} = \\ &= Sq \sum_{i,j} F(\lambda_i) \left( 1 - 2e^{-\alpha_i x_{mj}} + \frac{e^{-\alpha_i d}}{1 + \alpha_i w} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Assume, the informative signal to be the photocurrent. By the external voltage, we can obtain the largest values of  $x_m - x_{m1}$  and  $x_{m2}$  with the difference of 1nm, and the corresponding photocurrents  $I_1$  and  $I_2$ . From Lambert's law of the radiation absorption in the homogeneous environment, we will have the coefficient of the wave absorption,

$$\alpha_i = \frac{1}{\Delta x} \ln \frac{I_2}{I_1}, \quad (5)$$

where  $\Delta x_m = x_{m2} - x_{m1}$ .

Then, with the help of  $\alpha = f(\lambda_i)$  and with the corresponding program we can determine the length of the wave for the initial material of the photodetector, e.g. for silicon. By means of the formula for the photocurrent (1), we will obtain the intensities of separate waves in the absorbed radiation,

$$F_{0i} = \frac{I_i}{qS \left( 1 - 2e^{-\alpha_i x_{m_j}} + \frac{e^{-\alpha_i d}}{1 + \alpha_i L_n} \right)}. \quad (6)$$

**The object under investigation for safety and security reasons.** There are three main factors which are feasible for remote ( $\sim 3m$ ) identification of explosives using the phenomenon of molecular substance fluorescence of the Nitrogen oxide (NO) caused by photolysis of the vapor concentrated on the surface of the natural object which somehow had a contact with explosive [11].

1. The Nitrogen oxide (NO) nitro group is the widely used chemical component in most explosives.
2. (C-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>2</sub>, O-NO<sub>2</sub>) functional groups have the minimum connection energy and during the photolysis process the Nitrogen oxide (NO) portion is separating and producing the fluorescence (236 nm).

This allows to use the spectral analysis of the fluorescence wave and identify the explosive chemicals.

3. The molecules of explosives exhibit a wide absorption spectrum specific for Nitrogen oxide (NO) molecules. Therefore, in many cases, we can use the same radiation source for absorption which is used for the emission spectra.

When irradiated by a Krypton (Kr) laser beam (310 nm wavelength), the vapors of explosive materials undergo photolysis and, as a result, electronically excited molecules of Nitrogen oxide (NO), Nitrogen (N<sub>2</sub>) and Oxygen (O<sub>2</sub>) are formed. This excitation is accompanied by fluorescence at corresponding wavelengths (Fig. 3).

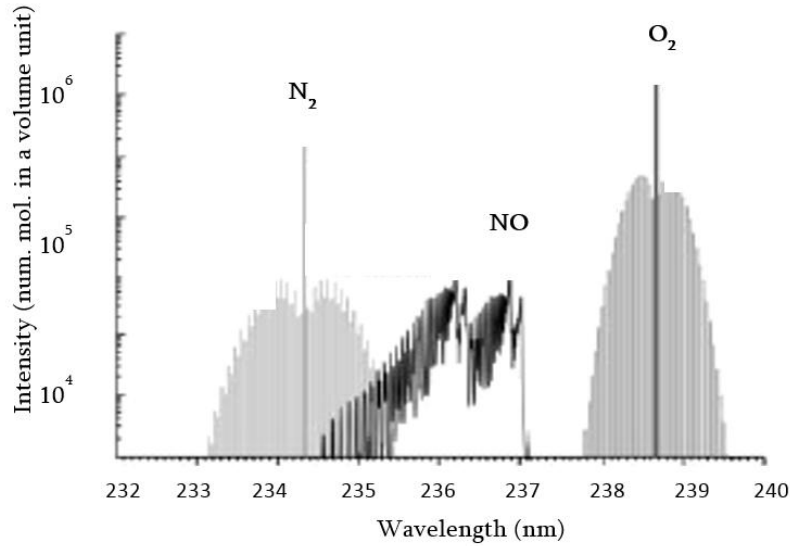


Fig. 3. The dependence of the intensity of the fluorescence wavelength from the Spector

During the modeling of the photodiode we used a corresponding range of solar spectrum [12, 13] (Fig. 4). Using the software developed based on our algorithm, we obtained spectral distribution of the radiation intensity for 13 selected wavelengths. The red dots signify the lack of adsorption, and the blue dots represent adsorption

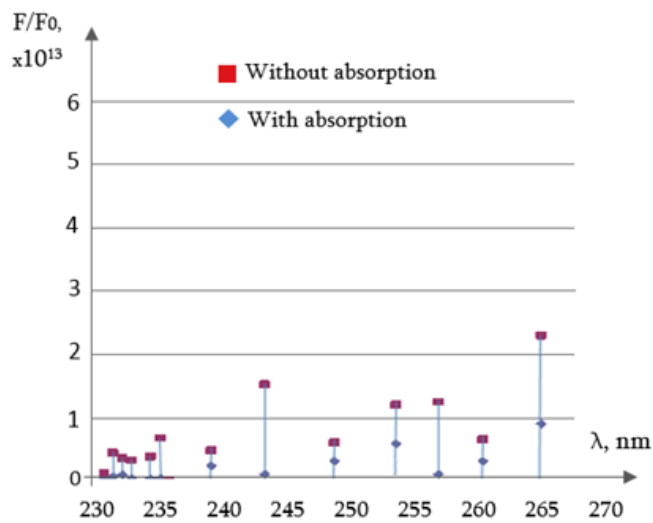


Fig.4. The spectral distribution of radiation relative intensity in the visible radiation range

**Conclusion.** The new studied model of the selectively sensitive sensor (photodiode) developed for contactless detection of optical information, and the identification and quantitative analysis of mixed substances in natural objects are investigated. In the radiation spectrum, the waves have different absorption depths, and the process of the selection of these waves is carried out via widening the registering volume by means of gradual change of the external voltage applied to the sensor. The developed complex algorithm allowed to perform spectral analysis without preliminary calibration. The usability of this sensor and the developed algorithm could be a best fit in the security and safety related applications where contactless detection of the explosives or harmful substances is required.

This study could provide a significant development in the production of sensors that are used in the new knowledge-based and multi-purpose devices applicable for economic, security and defense applications. The low-cost advantage of the technology is opening a new horizon for the natural objects investigation in wide areas where high volume of sensors is required.

### References

1. **Jiang P., Xia H., He Z., Wang Z.** Design of a Water Environment Monitoring System Based on Wireless Sensor Networks // *Sensors*.– 2009.– P. 6411-6434, doi: 10.3390/s90806411.
2. [www.mdpi.com/journal/sensors](http://www.mdpi.com/journal/sensors).
3. **Photometric Water Analysis and IQC.** www.mn-net.com.
4. **Pshinko G., Kobets S., Puzyrnaya L.** Concentration of U(VI) on a complexing sorbent for its determination by the spectrophotometric method // *Journal of Water Chemistry and Technology*. – 2013. – P. 143-151.
5. Patent DE 102013207801 A1. Photocell devices and methods for spectroscopic applications / **T. Kautzsch.**- 2012.
6. Patent WO2005078801 A1. Method and device for wavelength-sensitive photo-sensing / **T. Kautzsch.**– 2005.
7. Patent US 8916873 B2. Photodetector with controllable spectral response / **J. Chen, D. Poenar, M. Siu Tse.**– 2005.
8. Patent US 005671914A. Multi – Band Spectroscopic Photodetector Array / **N. Kalkhoran, F. Namavar.**–1997.
9. New Model of Spectral Analysis of Integral Flux of Radiation / **S. Khudaverdyan, M. Khachatryan, D. Khudaverdyan, S. Tsaturyan, et al** // NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics, DOI 10.1007/978-94-007-7-3-4-15. - Springer.- 2013. – P.261-269.
10. **Khudaverdyan S., Avetisyan A., Khudaverdyan D., Vaseashta A.** Photoelectric Properties of Selectively sensitive Sensors for the Detection of Hazardous Materials // NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics, DOI 10.1007/978-94-007-7-3-4-15.- Springer, 2013. – P. 183-191.
11. Modeling of a New Type of an Optoelectronic Biosensor for the Monitoring of the Environment and the Food Products. ISBN 978-94-007-2487-7 / **S. Khudaverdyan, O. Petrosyan, J. Dokholyan, S. Tsaturyan**// Springer. – 2012. – P. 179-184.

12. **Khudaverdyan S., Dokholyan J., Kocharyan A., Khudaverdyan D.** New type of photodetectors with selective spectral photosensitivity // Conference on “New developments in photodetection”. - Beaune, France, June, 2005. – P. 73 - 81.
13. **Khudaverdyan S., Dokholyan J., Kocharyan A.** Photoreceiver structures with the extended functional potentiality on the CdTe base // J. Phys. D: Applied Physics. – 2005. – V. 38, №2. – P. 272-275.

*Received on 10.10.2015.*

*Accepted for publication on 25.11.2015.*

## **ՖՈՏՈՏՈՒՍԱՆՔԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱՆՎՏԱՆԳՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԱՊԱՀՈՎՈՒԹՅԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐՈՒՄ**

**Ս.Հ. Ծատուրյան**

Նոր մոտեցմամբ ուսումնասիրվել է ընտրողական զգայնությամբ տվիչ (ֆոտոդիոդ), որն ունակ է զգալու և հայտնաբերելու տարբեր խառնուրդային նյութեր բնական օբյեկտներում: Կիրառված մեթոդով օպտիկական ֆոտոհոսանքի վերլուծության միջոցով հայտնաբերվում են խառնուրդային նյութերը, և մշակված ալգորիթմով կատարվում է քանակական հաշվարկ՝ առանձին նյութերի պարունակության արտացոլմամբ (230...1000 նմ սպեկտրային զգայնության միջակայքում): Ամփոփված է նաև նոր մոտեցմամբ ստեղծված ֆոտոսպեկտրամետրային, շարժական սարքի կոնցեպտը, որի հիմքում օգտագործված է ընտրողական զգայնությամբ դյուրակիր տվիչը: Այս մոտեցումը զգալիորեն էժանացնում է բազմանշանակ ֆոտոսպեկտրամետրային սարքերի արտադրությունը:

**Առանցքային բաներ.** ֆոտոհոսանք, ֆոտոդիոդ, ֆոտոդետեկտոր, ալգորիթմ, սպեկտրային վերլուծություն, անվտանգություն, թմրանյութեր, պայթուցիկ նյութեր:

## **АНАЛИЗ ФОТОТОКА В СИСТЕМАХ БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНЫ**

**С.У. Цатурян**

Исследуется новый подход к использованию датчиков с селективной чувствительностью (фотодиодов) для обнаружения и идентификации различных химических веществ. Изучены возможные случаи применения оптического анализа фототока для идентификации и качественного обнаружения различных смесей химических веществ в природных объектах с возможностью расчета количественных показателей (в спектральном диапазоне 230...1000 нм). Предлагается концепция портативного фотоспектрометра на базе датчика с селективной чувствительностью, позволяющая создать недорогое устройство для множества различных применений.

**Ключевые слова:** фототок, фотодиод, фотодетектор, алгоритм, спектральный анализ, безопасность, наркотические вещества, взрывчатые вещества.

**ԹՈՂ ԼՈՒՍԱՎՈՐ ԼԻՆԻ ԶԵՐ ՃԱՆԱՊԱՐՀԸ ՀԱՎԵՐԺՈՒԹՅԱՆ  
ԱՆԴԱՍՏԱՆՆԵՐՈՒՄ...**

**ПУСТЬ БУДЕТ СВЕТЛЫМ ВАШ ПУТЬ В ПРОСТОРАХ ВЕЧНОСТИ...**

**MAY YOUR PATH BE BRIGHT IN THE ETERNITY...**



**ՊԱՐՈՒՅՐ ԱՎԵՏԻՍԻ ՄԱԹԵՎՈՍՅԱՆ  
ПАРУЙР АВЕТИСОВИЧ МАТЕВОСЯН  
PARUYR AVETIS MATEVOSYAN**

**(1928-2015)**



**ՎԼԱԴԻՄԻՐ ԵՐՎԱՆԴԻ ԱՌՈՒՍԱՄՅԱՆ  
ВЛАДИМИР ЕРВАНДОВИЧ АРУСТАМЯН  
VLADIMIR YERVAND ARUSTAMYAN**

**(1934-2015)**

Հանդեսի խմբագրական խորհուրդը խորապես վշտացած է համալսարանի բազմավաստակ աշխատակիցներ՝ տ.գ.դ.-ներ, պրոֆեսորներ Պարույր Ավետիսի Մաթևոսյանի և Վլադիմիր Երվանդի Առուստամյանի մահվան կապակցությամբ:

Редакционная коллегия журнала глубоко скорбит в связи с кончиной многоуважаемых работников университета д.т.н., профессора Паруйра Аветисовича Матевосяна и д.т.н., профессора Владимира Ервандовича Арустамяна.

The Editorial Board of the Journal is deeply sorrowed at the passing of life professionals of the University Professors Paruyr Avetis Matevosyan and Vladimir Yervand Arustamyan.

## ՀԵՂԻՆԱԿՆԵՐԻ ՑՈՒՑԱԿ

- |     |                            |                                                                                           |
|-----|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | Աբրահամյան Լուսինե Սարգսի  | ասպիրանտ, Գյումրու մասնաճյուղ, ՀԱՊՀ                                                       |
| 2.  | Ավետիսյան Գևորգ Սահակի     | ասպիրանտ, ՀՀ ԳԱԱ-ի Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ                                |
| 3.  | Բալասանյան Սեյրան Շամիրի   | – տ.գ.դ., դոցենտ, Կապանի մասնաճյուղի փոխտնօրեն գիտական աշխատանքների գծով, ՀԱՊՀ            |
| 4.  | Բունիաթյան Վահե Վազգենի    | տ.գ.դ., պրոֆ., «Միկրոէլեկտրոնիկա և կենսաբժշկական սարքեր» ամբիոն, ՀԱՊՀ                     |
| 5.  | Գասպարյան Օլեգ Նիկոլայի    | – տ.գ.դ., պրոֆ., «Կառավարման համակարգեր» ամբիոնի վարիչ, ՀԱՊՀ                              |
| 6.  | Դաշտոյան Հովհաննես Ռոբերտի | – ասպիրանտ, «Միկրոէլեկտրոնիկա և կենսաբժշկական սարքեր» ամբիոն, ՀԱՊՀ                        |
| 7.  | Եզակյան Նարեկ Դավիթի       | – հայցորդ, ՀՀ ԳԱԱ-ի Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ                               |
| 8.  | Խաչիկյան Լիլիթ Էդուարդի    | – Հայցորդ, «Միկրոէլեկտրոնիկա և կենսաբժշկական սարքեր» ամբիոն, ՀԱՊՀ                         |
| 9.  | Ծատուրյան Ստեփան Հուսիկի   | – հայցորդ, «Ռադիոսարքավորումների կոնստրուկտավորման և արտադրության» ամբիոն, ՀԱՊՀ           |
| 10. | Կարոյան Գեղամ Սարգսի       | – տ.գ.թ., դոցենտ, «Էլեկտրոնիկայի ամբիոն», ՀԱՊՀ                                            |
| 11. | Ղուլյան Ալբերտ Գարեգինի    | – ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ ԳԱԱ-ի ակադեմիկոս, ՀՀ ԳԱԱ-ի Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ |
| 12. | Մամիկոնյան Բորիս Մամիկոնի  | – տ.գ.դ., պրոֆ., Գյումրու մասնաճյուղի փոխտնօրեն գիտական աշխատանքների գծով, ՀԱՊՀ           |

- |     |                            |                                                                                                    |
|-----|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 13. | Մուժիկյան Նարինե Սերգեյի   | – ճարտարագիտության մագիստրոս, “10X ENGINEERING” LLC, տեխնիկական աշխատակից                          |
| 14. | Նիկողոսյան Դավիթ Սաշայի    | ասպիրանտ, Գյումրու մասնաճյուղ, ՀԱՊՀ                                                                |
| 15. | Պետրոսյան Օլեգ Հարությունի | – տ.գ.դ., պրոֆ., «Միկրոէլեկտրոնիկա և կենսաբժշկական սարքեր» ամբիոնի վարիչ, ՀԱՊՀ                     |
| 16. | Սարգսյան Արևիկ Սերգեյի     | – տ.գ.թ., դոցենտ, «Կապի համակարգեր» ամբիոն, ՀԱՊՀ                                                   |
| 17. | Սիմոնյան Ռոբերտ Հայկի      | – ավագ գիտաշխատող, ՀՀ ԳԱԱ-ի Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ                                |
| 18. | Սիմոնյան Սարգիս Հովհաննեսի | – տ.գ.դ., պրոֆ., «Տեղեկատվական տեխնոլոգիաներ և ավտոմատացում» ամբիոնի վարիչ, ՀԱՊՀ                   |
| 19. | Յականով Վասիլի Մկրտչի      | – ֆ.-մ.գ.դ., «Քենդլ» սինքրոտրոնային հետազոտությունների ինստիտուտ հիմնադրամ կազմակերպության ղեկավար |
| 20. | Փիրումյան Համլետ Արազու    | – տ.գ.դ., ավագ գիտաշխատող, ՀՀ ԳԱԱ-ի Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ                        |
| 21. | Օհանյան Օվսաննա Համլետի    | – հայցորդ, «Կառավարման համակարգեր» ամբիոն, ՀԱՊՀ                                                    |

## СПИСОК АВТОРОВ

1. Абраамян Лусине Саргисовна - ассистент, Гюмрийский филиал НПУА
2. Аветисян Геворг Саакович - аспирант, Институт радиофизики и электроники НАН РА
3. Баласанян Сейран Шамирович - д.т.н., доцент, зам. директора по научным работам Капанского филиала НПУА
4. Буниатян Ваге Вазгенович - д.т.н., проф., кафедра “Микроэлектроника и биомедицинские устройства”, НПУА
5. Гаспарян Олег Николаевич - д.т.н., проф., зав. каф. “Системы управления”, НПУА
6. Гулян Алберт Гарегинovich - д.ф.-м.н., проф., Институт радиофизики и электроники НАН РА
7. Даштоян Оганес Робертович - аспирант, кафедра “Микроэлектроника и биомедицинские устройства”, НПУА
8. Езакян Нарек Давидович - соискатель, Институт радиофизики и электроники НАН РА
9. Кароян Гегам Саргисович - к.т.н., доцент, кафедра “Электроника”, НПУА
10. Мамиконян Борис Мамиконович - д.т.н., проф., зам. директора по научным работам Гюмрийского филиала НПУА
11. Мужикян Нарине Сергеевна - магистр инженерии, “10X ENGINEERING” LLC, технический сотрудник
12. Никогосян Давид Сашаевич - аспирант, Гюмрийский филиал НПУА
13. Оганян Овсанна Гамлетовна - соискатель, кафедра “Системы управления”, НПУА
14. Петросян Олег Арутюнович - д.т.н., проф., зав. каф. “Микроэлектроника и биомедицинские устройства”, НПУА
15. Пирумян Гамлет Аразович - д.т.н., старший научный сотрудник, Институт радиофизики и электроники НАН РА
16. Саргсян Аревик Сергеевна - к.т.н., доцент, кафедра “Системы связи”, НПУА

- |     |                            |                                                                                          |
|-----|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 17. | Симонян Роберт Гайкович    | - старший научный сотрудник, Институт радиофизики и электроники НАН РА                   |
| 18. | Симонян Саргис Оганнесович | - д.т.н., проф., зав. каф. “Информационные технологии и автоматизация”, НПУА             |
| 19. | Хачикян Лилит Эдуардовна   | - соискатель, кафедра “Микроэлектроника и биомедицинские устройства”, НПУА               |
| 20. | Цаканов Василий Мкртичович | - д.ф.-м.н., руководитель организации фонда Института синхротронных исследований “Кендл” |
| 21. | Цатурян Степан Усикович    | - соискатель, кафедра “Конструирование и производство радиоустройств”, НПУА              |

## LIST OF AUTHORS

- |     |                            |                                                                                                  |
|-----|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | Abrahamyan Lusine Sargis   | - Assistant of the Gyumri branch, NPUA                                                           |
| 2.  | Avetisyan Gevorg Sahak     | - Post-graduate student of the Institute of Radiophysics and Electronics, NAS RA                 |
| 3.  | Balasanyan Seyran Shamir   | - Doctor of tech.sci., Assoc. Prof., Deputy Director on research works of the Kapan branch, NPUA |
| 4.  | Buniatyan Vahe Vazgen      | - Doctor of tech.sci., Prof. of the Chair “Microelectronics and Biomedical Devices”, NPUA        |
| 5.  | Dashtoyan Hovhannes Robert | - Post-graduate student of the Chair “Microelectronics and Biomedical Devices”, NPUA             |
| 6.  | Gasparyan Oleg Nikolay     | - Doctor of tech.sci., Prof., Head of the Chair “System Control”, NPUA                           |
| 7.  | Ghulyan Albert Garegin     | - Doctor of Phys.-Math. sci., Prof., Institute of Radiophysics and Electronics, NAS RA           |
| 8.  | Karoyan Gegham Sargis      | - Candidate of tech. sci., Associate Prof. of the Chair “Electronics”, NPUA                      |
| 9.  | Khachikyan Lilit Eduard    | - Probationer of the Chair “Microelectronics and Biomedical Devices”, NPUA                       |
| 10. | Mamikonyan Boris Mamikon   | - Doctor of tech.sci., Prof., Deputy Director on research works of the Gyumri branch, NPUA       |
| 11. | Muzhikyan Narine Sergey    | - Master of engineering, “10X ENGINEERING” LLC, technical worker                                 |
| 12. | Nikoghosyan David Sasha    | - Post-graduate student of the Gyumri branch, NPUA                                               |
| 13. | Ohanyan Ovsanna Hamlet     | - Post-graduate student of the Chair “System Control”, NPUA                                      |
| 14. | Petrosyan Oleg Harutyun    | - Doctor of tech.sci., Prof., Head of the Chair “Microelectronics and Biomedical Devices”, NPUA  |

- |     |                           |                                                                                                      |
|-----|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15. | Pirumyan Hamlet Araz      | - Doctor of tech. sci., senior researcher of the Institute of Radiophysics and Electronics, NAS RA   |
| 16. | Sargsyan Arevik Sergey    | - Candidate of tech. sci., Associate prof. of the Chair “Communication Systems”, NPUA                |
| 17. | Simonyan Robert Hayk      | - Senior researcher of the Institute of Radiophysics and Electronics, NAS RA                         |
| 18. | Simonyan Sargis Hovhannes | - Doctor of tech. sci., Prof., Head of the Chair “Information Technologies and Automatization”, NPUA |
| 19. | Tsakanov Vasiliy Mkrtych  | - Doctor of Phys.-Math. sci., Head of the Fund of Organization “Candle” Synchrotron Research         |
| 20. | Tsaturyan Stepan Husik    | - Probationer of the Chair “Design and Manufacture of Radio Devices”, NPUA                           |
| 21. | Yezakyan Narek David      | - Probationer of the Institute of Radiophysics and Electronics, NAS RA                               |

## ՎՈՒՄՆԵՐԻ ԶԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ԿԱՆՈՆՆԵՐԸ

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի Բանբերը գրախոսվող հանդես է, որը հրատարակում է գիտատեխնիկական, նաև պատմիրված ակնարկային-վերլուծական բնույթի հոդվածներ, հաղորդումներ, ինչպես և տվյալ բնագավառի անվանի գիտնականների հոբելյաններին, նոր գրքերին, համալսարանի մասնակցությամբ կայացած գիտաժողովներին նվիրված նյութեր, խմբագրությանն ուղղված նամակներ:

Նյութը խմբագրություն ներկայացվում է ըստ հետևյալ պահանջների.

1. Երկու օրինակ, նաև էլեկտրոնային տարբերակով ([banber\\_iter@seua.am](mailto:banber_iter@seua.am)), համակարգչային շարվածքը՝ Microsoft Office Word: Հոդվածի ծավալը կարող է լինել մինչև 10 էջ, հաղորդումներինը՝ մինչև 4 էջ: Տեքստը շարադրվում է A4 չափի թղթի վրա, աշխատանքային դաշտը՝ Top-5սմ, Bottom-5,1սմ, Left-5,75սմ, Right-1,75սմ, Footer-4,6սմ, միջտողային տարածությունը (Line spacing)՝ 1,1, պարբերությունը (First line)՝ 0,75 սմ: Հայերեն լինելու դեպքում նյութը շարադրվում է GHEA Grapalat տառատեսակով, տառաչափը՝ 10, իսկ ռուսերենի կամ անգլերենի դեպքում՝ Times New Roman տառատեսակով, տառաչափը՝ 11:

2. Թղթի վերևի ծախս անկունում գրվում է համապիտանի տասնորդական դարականիչը՝ տեքստին համապատասխան լեզվով (ՀՏԴ, ՄԴԿ, UDC), հաջորդ տողի կենտրոնում վերնագիրը՝ գլխատառերով, հաջորդ տողում հեղինակ(ներ)ի անվան-հայրանվան սկզբնատառերը և ազգանուն(ներ)ը՝ bold, 10 տառաչափով հայերեն տեքստի դեպքում և 11 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում, մեկ տող ներքև՝ հեղինակ(ներ)ի աշխատավայրը՝ italic, 9 տառաչափով՝ հայերեն և 10 տառաչափով՝ ռուսերեն և անգլերեն:

3. Նյութը սկսվում է ամփոփումով (անտառագիտ) այն լեզվով, որով ներկայացված է: Ամփոփումն ավարտվում է առանցքային բառերով՝ տառաչափը՝ 9 հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում, և միայն «Առանցքային բառեր» արտահայտությունը՝ bold, italic: Ամփոփումը պետք է լինի 200-250 բառ, առանցքային բառերը կամ բառակապակցությունները՝ 4-8 բառ:

4. Երաշխավորվում է նյութի շարադրման հետևյալ կարգը. «Ներածություն», որը պետք է համառոտ ներառի հարցի վիճակը, թեմայի արդիականությունը և հետազոտության նպատակը, «Ընդհանուր դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը», «Հետազոտության արդյունքները», «Եզրակացություն», անհրաժեշտության դեպքում՝ նաև այլ բաժիններ՝ համապատասխան վերնագրերով:

5. Տեքստում հղումները գրականությանը նշվում են ուղղանկյուն փակագծերով: Բանաձևերը ներկայացվում են նոր տողից, Equation Editor ծրագրով, italic, տառաչափը՝ 11, անհրաժեշտության դեպքում համարակալվում են տողի վերջում՝ սովորական (կոր) փակագծում:

6. Նկարներն ու աղյուսակները հաջորդում են տեքստում համապատասխան հղումներին: «Նկ.» և «Աղյուսակ» բառերը, նկարների մակագրությունը և աղյուսակների անվանումները գրվում են Italic 9 տառաչափով հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում:

7. Տեքստին հաջորդում է գրականության ցանկը՝ 9 տառաչափով հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում, միայն հեղինակի ազգանունն ու անվան-հայրանվան սկզբնատառերը՝ bold, «Գրականություն» բառը՝ տողի կենտրոնում, փոքրատառերով: Ցանկում գրականության յուրաքանչյուր աղբյուր համարակալվում է ըստ տեքստում իր հղման հերթականության: Գրականության աղբյուրները պարբերական հրատարակությունների դեպքում ներկայացվում են հետևյալ կարգով. հեղինակի ազգանունը, անվան-հայրանվան սկզբնատառերը, վերնագիրը, հանդեսի անվանումը կամ ընդունված հապավումը, հրատարակման տարեթիվը, հատորի ու թողարկման համարները, հերթական համարը, նյութի զետեղման էջերը, գրքերի դեպքում՝ հեղինակի ազգանունը, անվան-հայրանվան սկզբնատառերը, վերնագիրը, հրատարակման վայրը, հրատարակչությունը, թվականը, էջերի քանակը:

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

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

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

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Вестник Национального политехнического университета Армении - рецензируемый журнал, в котором публикуются статьи научно-технического характера, сообщения, заказные обзорно-аналитические статьи, а также материалы, посвященные юбилеям известных в данной области ученых, новым книгам, научным конференциям при участии университета, и письма в адрес редакции.

Материал представляется в редакцию в соответствии со следующими правилами:

1. Статья в двух экземплярах и файл ([banber\\_iter@seua.am](mailto:banber_iter@seua.am)) статьи в формате Microsoft Office Word. Объем статьи не должен превышать 10 страниц, объем сообщений – до 4-х страниц. Формат страницы – А4. Рабочее поле: Top – 5cm, Bottom – 5,1cm, Left – 5,75cm, Right – 1,75cm, Footer – 4,6cm, межстрочный интервал (Line spacing) – 1,1, красная строка (First line) – 0,75cm. Для статьи, написанной на армянском языке, применяется шрифт GHEA Grapalat (размер шрифта - 10), а на русском и английском – Times New Roman (размер шрифта – 11).

2. В левом верхнем углу первого листа указывается универсальный десятичный классификатор (ՀՏԻ, УДК, UDC); строкой ниже по центру указывается название статьи – заглавными буквами, шрифт Bold, размер 10 – на арм.яз., 11 – на рус. и англ. яз., строкой ниже - инициалы (И.О.) и фамилия - строчными буквами, шрифт Bold, размер 10 – на арм.яз., 11 – на рус. и англ. яз., выравнивание по центру; строкой ниже – место работы - шрифт italic, размер 9.

3. Материал текста начинается с аннотации и представляется на том языке, на котором написана статья. Текст аннотации должен включать 200-250 слов. После аннотации пишутся ключевые слова – от 4-х до 8-и слов или словосочетаний. Размер текста аннотации и ключевых слов 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз., словосочетание **«Ключевые слова»** - Bold, italic.

4. Рекомендуется следующий порядок изложения материала статьи: введение, в котором должны быть кратко представлены состояние вопроса, актуальность темы и цель исследования; постановка задачи и обоснование методики; результаты исследования; заключение (эти, а при необходимости, и другие разделы должны иметь соответствующие заголовки).

5. Ссылки на литературу в тексте даются в квадратных скобках. Формулы и математические выражения набираются редактором Microsoft Equation, italic, размер – 11. Формулы набираются с новой строки, выравнивание по центру. При необходимости, их нумеруют. Номер формулы располагается в конце строки, в круглых скобках.

6. Рисунки и таблицы располагаются в тексте по ходу ссылки на них. Слова *«Рис.»*, *«Таблица»*, а также названия рисунков и таблиц пишутся italic, размер 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз.

7. В конце статьи дается список литературы: размер 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз. Слово **«Литература»** располагается в центре строки строчными буквами, Bold. Цитируемая литература нумеруется в порядке ссылки на нее в тексте. Каждый источник представляется в следующем порядке: в случае ссылки на статью из журнала: **фамилия, инициалы И.О.** - Bold, название статьи, название журнала, место издания, год издания, том и номер издания, с какой по какую страницы занимает статья в этом журнале; в случае ссылки на книгу: **фамилия, инициалы И.О.**, название книги, место издания, название издательства, год издания, общее количество страниц.

8. После литературы представляются аннотации вместе с ключевыми словами на двух других языках. Если статья написана на армянском языке, то сначала дается аннотация на русском языке, затем на английском; если написана на русском языке – соответственно на армянском и английском, а если на английском – соответственно на армянском и русском языках. Содержание аннотаций и ключевые слова должны быть на трех языках одинаковыми.

9. Статья подписывается автором (авторами). В конце статьи ставится дата (число, месяц, год) представления статьи. Отредактированный и откорректированный вариант рукописи согласовывается с автором (авторами).

10. На отдельной странице необходимо представить следующие авторские данные: фамилия, имя, отчество; полное наименование места работы, места учебы; занимаемая должность, ученая степень и звание; номера телефонов (служебный, домашний, мобильный).

## RULES FOR PREPARATION OF MANUSCRIPTS

Proceedings of National Polytechnic University of Armenia is a peer-reviewed journal which publishes scientific-technical and also analytic –review papers, short communications, as well as materials about the jubilees of prominent scientists, new books, scientific conferences coorganized by the University, letters addressed to the editorial board.

The material should be presented to the editorial staff in accordance with the requirements given below.

1. The authors are requested to submit two hard copies, and also the electronic version ([banber\\_jter@seua.am](mailto:banber_jter@seua.am)) of the manuscript by Microsoft Office Word. The volume of scientific paper is limited to 10 pages, and to 4 pages for short communications. The text should be printed on A4 sized paper. The text margins should be: Top – 5cm, Bottom – 5.1 cm, Left – 5.75 cm, Right – 1.75 cm, Footer – 4.6 cm, Line-spacing – 1.1 cm, the first line – 0.75 cm. Texts in Armenian should be printed by the GHEA Grapalat, font size 10, and the texts in Russian or English by Times New Roman, in font size 11.

2. On the top left corner of the first page, the Universal Decimal Classifier is placed (ՀՏԴ, ՄԴԿ, UDC). The title of the article in capital letters, bold, font size 10 for texts in Armenian, and 11 – for Russian and English should be placed in the centre of the next line. The initials and the surname(s) in small letters and bold, in font size 10, for texts in Armenian, and in font size 11 for the ones in English and Russian should be lined up in the centre of the next line. In the following line, the workplace of the author (s) should be mentioned, italic, font size 9.

3. The text begins with an abstract in the language it is presented. The abstract should include 200-250 words. It ends with keywords in font size 9 for texts in Armenian, and in font size 10 for the ones in English and Russian. Only the word “Keywords” should be bold, italic. The number of keywords or word combinations - 4-8.

4. The papers should include an introduction briefly introducing the state of the problem area, the importance of the subject and the aim of investigation, as well as sections describing the statement of the problem and selection of the methodology, the results of investigation, conclusion (other sections if necessary) with subtitles, and it should end with the list of references.

5. The references in the text should be given in square brackets. The formulae should be introduced by the Microsoft Equation Editor. They are printed from a new line in italic, font size 11 in the center of the line, and if necessary numbered at the end of the line in round brackets..

6. Figures and tables should follow their references given in the text. The words “Fig”, “Table”, the figure inscriptions and the table names should be printed in italic, in font size 9, for texts in Armenian, and in font size 10 for texts in English and Russian.

7. The text is followed by the references in font size 9 for texts in Armenian and in font size 10 for texts in English and Russian. Only the author’s initials and surname should be bold. The word “References” should be placed in the centre of the line in small letters bold. In the list of references each source should be enumerated according to its reference number in the text. For the periodicals the references should be introduced in the following style: the author’s surname, initials, bold, title, year, numbers of the volume and issue, page numbers, and for books – the author's name, initials, full title, publication place, publisher, year, total number of pages.

8. The references are followed by the abstracts in the other two languages. If the text is in Armenian, the abstracts should be first in Russian and then in English. The text in Russian should be followed first by Armenian and then by English abstracts, while the texts in English should be followed first by Armenian, then by Russian abstracts. The abstracts in all the three languages should be identical in content and keywords.

9. The manuscript should be signed by the author(s) with indication of the submission date. The edited and proofread version of the manuscript should be agreed upon by the author(s).

10. On a separate page, the author(s) should introduce his/her/their full surname(s), name(s), patronymic(s); the full name(s) of employment place, educational institution; the position occupied scientific degree, telephone numbers (office, home, mobile).

**Բ Ա Ն Բ Ե Ր**

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

**ՏԵՂԵԿԱՏՎԱԿԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՆԵՐ,  
ԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱ, ՌԱԴԻՈՏԵԽՆԻԿԱ**

**В Е С Т Н И К**

НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА АРМЕНИИ

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,  
ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА**

**PROCEEDINGS**

OF NATIONAL POLYTECHNIC UNIVERSITY OF ARMENIA

**INFORMATION TECHNOLOGIES,  
ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING**

**2015**

**2**

Հրատ. խմբագիր՝  
Խմբագիրներ՝

Ժաննա Սեյրանյան  
Հասմիկ Պետրոսյան  
Հասմիկ Ղազարյան

Շապիկի ձևավորումը՝

Էդուարդ Կուրդինյան

Ստորագրված է տպագրության՝ 23.12.2015թ.:

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

Շարվածքը՝ համակարգչային:

Տառատեսակը՝ Times New Roman, GHEA Grapalat: 7.5 տպ. մամ.:

Պատվեր՝ 569: Տպաքանակ՝ 120

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