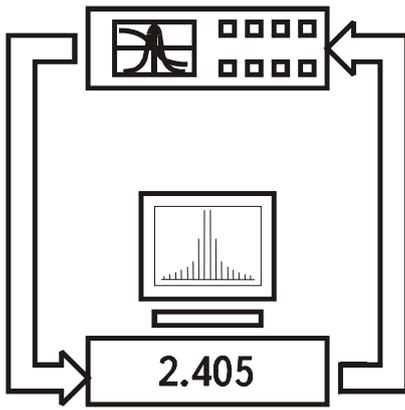
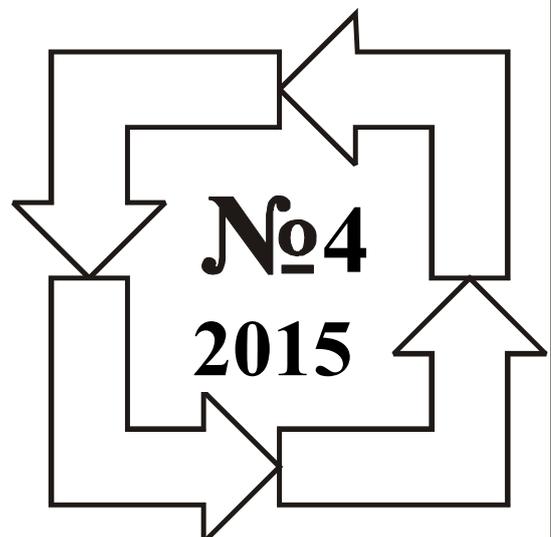


ISSN 2219-9365



*МІЖНАРОДНИЙ  
НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ  
ЖУРНАЛ*

**ВИМІРЮВАЛЬНА  
ТА  
ОБЧИСЛЮВАЛЬНА  
ТЕХНІКА  
В  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
ПРОЦЕСАХ**



*ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ*

# **Міжнародний науково-технічний журнал**

## **ВИМІРЮВАЛЬНА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ**

**Заснований в травні 1997 р.**

**Виходить 4 рази на рік**

**Хмельницький, 2015, №4 (53)**

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради  
Хмельницького національного університету, протокол № 4 від 26.11.2015 р.**

**Засновники:** Хмельницький національний університет  
Українська технологічна академія (м. Київ)  
**Видавець:** Хмельницький національний університет

Затверджене як фахове видання постановою президії ВАК України від 10.02.2010 № 1-05/1  
Включено у РИНЦ (дог. № 212-04/2013) [http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=37653](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37653)  
Index Copernicus <http://jmi2012.indexcopernicus.com/+++++,p24781565,3.html>  
Google Scholar [http://scholar.google.com.ua/citations?user=nwN\\_nusAAAAJ&hl=uk](http://scholar.google.com.ua/citations?user=nwN_nusAAAAJ&hl=uk)

**Головний редактор** д.т.н., проф. І.В. Троцишин  
**Заступник головного редактора та  
голова редакційної колегії** д.т.н., проф. В.Т. Кондратов  
**Відповідальний секретар** к.т.н., доц. К.Л. Горященко

### **Редакційна колегія:**

Бубулис Алгимантас, д.т.н., проф. (Литва); Вільям Кей Джі, д.т.н., проф., (Республіка Корея);  
Водотовка В.І., д.т.н., проф.; Дивак М.П., д.т.н., проф.; Дудикевич В.Б., д.т.н., проф.;  
Жултовський Богдан, д.т.н., проф. (Польща); Злепко С.М., д.т.н., проф.; Каплун В.Г., д.т.н., проф.;  
Кичак В.М., д.т.н., проф.; Кожемяко В.П., д.т.н., проф.; Коробко Є.В., д.т.н., проф. (Білорусія);  
Косенков В.Д., к.т.н., проф.; Кузьмін І.В., д.т.н., проф.; Лепіх Я.І., д.ф.-м.н., проф.;  
Мансуров Тофік Магомедович, д.т.н., проф. (Азербайджан); Мельник А.О., д.т.н., проф.;  
Натріашвілі Тамаз Мамієвич, д.т.н., проф. (Грузія); Павленко Ю.Ф., д.т.н., проф.; Павлов С.В., д.т.н.,  
проф.; Підченко С.К., д.т.н., проф.; Попов Валентин, д. природничих н., проф. (Німеччина);  
Проценко М.Б., д.т.н., проф.; Пунчеко О.П., д.філ.н., проф.; Ройзман В.П., д.т.н., проф.; Романюк В.В.,  
д.т.н., доцент; Романюк О.Н., д.т.н., проф.; Ротштейн Олександр Петрович, д.т.н., проф. (Ізраїль);  
Сопрунюк П.М., д.т.н., проф.; Стахов Олексій Петрович, д.т.н., проф. (Канада), Стенцель Й.І., д.т.н.,  
проф.; Сурду М.М., д.т.н., проф.; Філінюк М.А., д.т.н., проф.; Шарпан О.Б., д.т.н., проф.

**Технічний редактор К.Л. Горященко**

**Адреса редакції:** редакція журналу "Вимірювальна та обчислювальна техніка в  
технологічних процесах", (кімн. 4-402), Хмельницький національний  
університет, вул. Інститутська 11, м. Хмельницький, 29016, Україна.

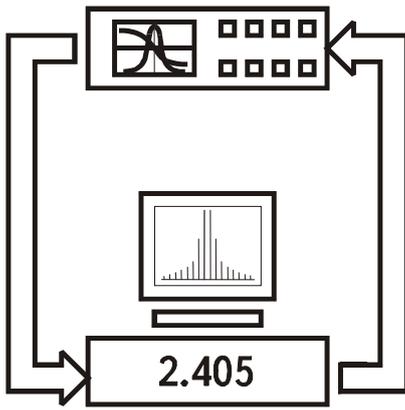
**Тел:** (+38) 097-684-34-29. **E-mail:** [vottp.tiv@gmail.com](mailto:vottp.tiv@gmail.com)

**web:** <http://fetronics.ho.com.ua>  
<http://journals.khnu.km.ua/vottp/>

Зареєстровано Міністерством юстиції України  
Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
Серія КВ №16040-4512ПР від 16 грудня 2009 року.

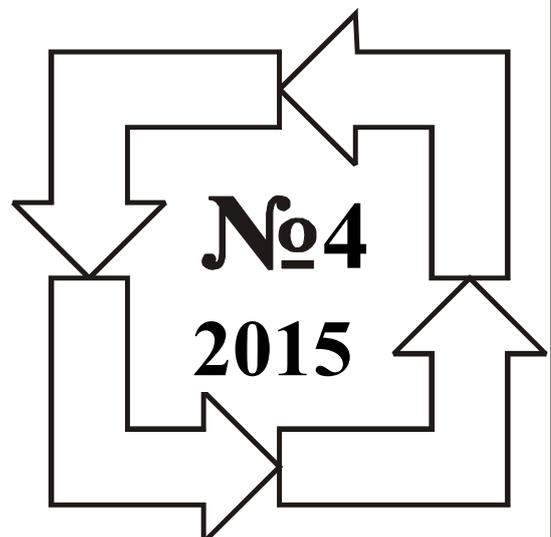
© Хмельницький національний університет, 2015  
© Редакція "Вимірювальна та обчислювальна  
техніка в технологічних процесах", 2015

ISSN 2219-9365



*INTERNATIONAL  
SCIENTIFIC-TECHNICAL  
MAGAZINE*

**MEASURING  
AND  
COMPUTING  
DEVICES  
IN  
TECHNOLOGICAL  
PROCESSES**



*KHMELNITSKY*

*International scientific-technical magazine*

**MEASURING AND COMPUTING DEVICES  
IN TECHNOLOGICAL PROCESSES**

*Founded in 1997 May*

*Published 4 times in a year*

***Khmelnitsky, 2015, №4 (53)***

Advised for printing by solution of scientific council of  
Khmelnitsky national university, protocol № 4 from 26.11.2015

**Founders** Khmelnitsky national university, Khmelnitsky, Ukraine  
Ukrainian Technological Academy, Kyiv, Ukraine

**Publisher** Khmelnitsky national university, Khmelnitsky, Ukraine

Approved as a professional publication the decision  
of Higher Attestation Commission  
at 10.02.2010, № 1-05/1

[http://vak.org.ua/docs/prof\\_journals/journal\\_list/whole.pdf](http://vak.org.ua/docs/prof_journals/journal_list/whole.pdf)

Included in Russian Index  
of Scientific Citations  
according to the contract № 212-04/2013  
[http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=37653](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37653)

Approved as a professional publication  
Included in Russian Index of Scientific  
Citations (№ 212-04/2013)  
Index Copernicus  
Google Scholar

The decision of Higher Attestation Commission, 10.02.2010, № 1-05/1  
[http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=37653](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37653)  
<http://jml2012.indexcopernicus.com/+++++,p24781565,3.html>  
[http://scholar.google.com.ua/citations?user=nwN\\_nusAAAAJ&hl=uk](http://scholar.google.com.ua/citations?user=nwN_nusAAAAJ&hl=uk)

Chief Editor  
Deputy Editor and Chairman of Editorial Board  
Executive Secretary

Ivan V. Trotsishin, prof., doctor of science  
V.T. Kondratov, prof., doctor of science  
K.L. Horiashchenko, associate prof.

**Editorial board:**

**Algimantas Bubulis**, prof. (Lithuania); **Vilyam Kay Dzhi**, prof., (Republic of Korea); **Vodotovka V.I.**, Prof. ;  
**Divak M.P.**, prof. ; **Dudikevich V.B.**, prof. ; **Zhultovsky Bogdan**, prof. (Poland); **Zlepko S.M.**, prof. ;  
**Kaplun V.G.**, prof. ; **Kychak V.M.**, prof. ; **Kozhemyako V.P.**, prof. ; **Korobko E.V.**, prof. (Belarus);  
**Kosenkov V.D.**, Prof. ; **Kuzmin I.V.**, Prof. ; **Lepih YA.I.**, prof. ; **Mansurov Tofik Magomedovich**, prof.  
(Azerbaijan); **Melnik S.A.**, prof. ; **Natriashvili Tamaz Mamievich**, prof. (Georgia); **Pavlenko Yu.F.**, prof. ;  
**Pavlov S.V.**, prof. ; **Pidchenko S.K.**, prof. ; **Valentin Popov**, prof. (Germany); **Protsenko M.B.**, prof. ;  
**Puncheko O.P.**, prof. ; **Roizman V.P.**, prof. ; **Romaniuk V.V.**, associate professor; **Romanyuk O.N.**, prof. ;  
**Rothstein Oleksandr Petrovich**, prof. (Israel); **Soprunyuk P.M.**, prof. ; **Stakhov Olexiy Petrovic**, prof.  
(Canada), **Stenzel Y.I.**, prof. ; **Surdu M.M.**, prof. ; **Filinyuk M.A.**, prof. ; **Sharpan O.B.**, prof. .

Technical editor **K.L. Horiashchenko**

**Address of editorial office:** *editorial office of magazine "Measuring and Computing Devices in  
Technological Processes", Khmelnitsky national university, Ukraine,  
29016, Khmelnitsky, 11 Institutaska str., (4-402 room),*

**phone:** (+38) 097-684-34-29 (Russian and Ukrainian only) **E-mail:** [vottp.tiv@gmail.com](mailto:vottp.tiv@gmail.com)

**web:** <http://fetronics.ho.com.ua>  
<http://journals.khnu.km.ua/vottp/>

Subscribed by Ministry of Justice of Ukraine  
Certificate about governmental registration of publishing means of mass information  
Series "KV" №16040-4512PR, December ,16, 2009.

© **Khmelnitsky national university, 2015**  
© **Magazine "Measuring and Computing  
Devices in Technological Processes", 2015**

## ЗМІСТ

### ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МЕТРОЛОГІЇ, ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

<b>В.Т. КОНДРАТОВ.</b> ТЕОРИЯ ИЗБЫТОЧНЫХ И СВЕРХИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ: СВЕРХИЗБЫТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗИСТОРОВ И РЕЗИСТИВНЫХ СЕНСОРОВ. СООБЩЕНИЕ 1 .....	7
<b>V. F. TIMKOV, S. V. TIMKOV, V. A. ZHUKOV.</b> GRAVITATIONAL-ELECTROMAGNETIC RESONANCE OF THE SUN AS ONE OF THE POSSIBLE SOURCES OF AURORAL RADIO EMISSION OF PLANETS IN KILOMETRIC RANGE .....	23
<b>В.А. ВЫШИНСКИЙ.</b> МАТЕРИЯ, ПРОСТРАНСТВО, ВРЕМЯ .....	33

### ОПТИЧНІ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

<b>С. Г. ДЖАБАРОВ.</b> КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ТИТАНАТА БАРИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ .....	37
<b>О. М. ВАСЛЕВСЬКИЙ.</b> МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ДОВІРЧОГО РІВНЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ РОЗШИРЕНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОСТІ ІОНІВ .....	48
<b>Л. А. МИХЕЕНКО, М. А. ПУГИНА.</b> АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭТАЛОНА ЯРКОСТИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СФЕРЫ С РАССЕЙВАТЕЛЕМ НА ВЫХОДНОЕ ЯРКОСТНОЕ ПОЛЕ .....	52
<b>Л.А. МИХЕЕНКО, М.А. ПУГИНА.</b> ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ВЫХОДНОГО ЯРКОСТНОГО ПОЛЯ ЭТАЛОНА ЯРКОСТИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СФЕРЫ .....	59
<b>О.Б. ШАНДИБА, Д.М. ШПЕТНИЙ, А.В. ТОЛБАТОВ.</b> ВПЛИВ РОЗЧИННОСТІ ГРАНУЛЬОВАНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ НА ДИНАМІКУ МІГРАЦІЇ РУХОМИХ ВОМПОНЕНТІВ В ГРУНТОВО-ВОДНИХ СИСТЕМАХ СХИЛОВИХ ЗЕМЕЛЬ .....	64
<b>А.В. ФЕСЕНКО, В.Н. БОРОВИЦКИЙ.</b> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКАНИРУЮЩЕГО ОПТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ .....	69

### ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ТА РАДІОТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

<b>Т. Х. ГУСЕЙНОВ, М. Н. АГАЕВ, Э. А. РАСУЛОВ.</b> РЕЛАКСАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ДВОЙНОМ СЛОЕ В ПЛАЗМЕ РТУТНОГО РАЗРЯДА .....	75
<b>О. М. ШИНКАРУК, І. І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ, Д. О. ЛЕВЧУНЕЦЬ.</b> ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗРІЗНЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ВУЗЬКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ НОВИХ ПІДХОДІВ ЧАСТОТНО-ЧАСОВОЇ ВАГОВОЇ ОБРОБКИ .....	79
<b>V.M. YEVLANOV, K.M. YEFIMOVA, S. I. AZAROV.</b> PROVIDING ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF THE SECONDARY ELECTRICAL CIRCUITS OF NUCLEAR POWER PLANTS .....	84
<b>В.І. ЯСЬКІВ.</b> НОВІ МЕТОДИ ПОБУДОВИ КЕРОВАНИХ ІМПУЛЬСНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ВИХОДОМ НА ЗМІННОМУ СТРУМІ .....	92
<b>А.В. РУДИК.</b> ФАЗОЧАСТОТНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ АМПЛІТУДИ ЗМІННОЇ НАПРУГИ СИНУСОЇДАЛЬНОЇ ФОРМИ .....	96

### ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ І КОМПЛЕКСИ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

<b>С.М. БАБЧУК.</b> СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ НАФТОГАЗОВИХ ПІДПРИЄМСТВ НА БАЗІ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ, ЯКІ ПІДТРИМУЮТЬ РЕЖИМ ОБМІНУ ДАНИМИ "КЛІЄНТ-СЕРВЕР" .....	103
<b>С.В. БАБАК.</b> ДИСТАНЦІЙНИЙ КОНТРОЛЬ ДОВКІЛЛЯ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ .....	107
<b>А.В. ЯСЬКІВ.</b> МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕМАГНІЧЕННЯ МАГНІТОМ'ЯКИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИСОКОЮ КРУТИЗНОЮ ПЕТЛІ ГІСТЕРЕЗИСУ .....	112
<b>М.П. КОМАР.</b> ПОБУДОВА ІЄРАРХІЧНОГО КЛАСИФІКАТОРА КОМП'ЮТЕРНИХ АТАК НА БАЗІ БАГАТОКАНАЛЬНИХ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ДЕТЕКТОРІВ .....	119
<b>В.Д. ДМИТРИЕНКО, С.Ю. ЛЕОНОВ, В.А. БРЕЧКО.</b> МНОГОНАПРАВЛЕННАЯ АССОЦИАТИВНАЯ ПАМЯТЬ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ .....	124
<b>Ю.М. ГЕБУРА.</b> ДЕРЕВОПОДІБНІ РОЗПІЗНАЮЧІ МОДЕЛІ, ЯК КОНЦЕПТУАЛЬНА ОСНОВА АНАЛІЗУ СУКУПНОСТІ ІНФОРМАЦІЇ .....	130
<b>В.В. ЯЦКІВ.</b> КОНТРОЛЬ ВИКОНАННЯ АРИФМЕТИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ НА ОСНОВІ МОДУЛЯРНИХ КОДІВ .....	135
<b>В.М. ДУБОВОЙ, О.Д. НИКИТЕНКО.</b> ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ .....	138

### БІОМЕДИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ І ТЕХНОЛОГІЇ

<b>С.М. ЗЛЕПКО, С.В. КОСТІШИН, Р.М. ВИРОЗУБ, Н.В. ТИТОВА.</b> КЛАСИФІКАЦІЯ ПЕРВИННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ БІОМЕДИЧНИХ СИГНАЛІВ .....	146
<b>С. В. ТИМЧИК.</b> ПІДСИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЛІКАРЕМ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ .....	151

<b>М.Ф. БОГОМОЛОВ, О. В. СТАРОДУБ.</b> РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕРИТРОЦИТУ ЯК ОБ'ЄКТА ВИМІРЮВАНЬ ЛАЗЕРНИХ ДІАГНОСТИЧНИХ СИСТЕМ.....	156
<b>Я.В. САВЕНКО.</b> ІНТЕГРОВАНА МЕТОДОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ МЕДИКО-ДІАГНОСТИЧНИХ СИСТЕМ.....	162

#### ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ ТА ТЕХНОЛОГІЯМИ

<b>А.В. ГОРОШКО, В.П. РОЙЗМАН.</b> СИНТЕЗ ДОПУСКІВ В ЗАДАЧІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕМЕНТІВ ГЕРМЕТИЗОВНОЇ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ.....	167
<b>Є.О. ЗАЙЦЕВ, В.Є. СИДОРЧУК, І.В. СИДОРЧУК, А.М. ШПИЛЬКА.</b> ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ ПРИ ОБРОБЦІ МОНІТОРІНГОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ШЛІФУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	175
<b>В.С. ПАЛАМАРЧУК, О. В. ПОЛЮХОВИЧ, О. Є. ЛУППО.</b> ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ ТРАЕКТОРІЇ ПОЛЬОТУ ПОВІТРЯНОГО СУДНА.....	180
<b>Н. CANALES, A.O.VOLKOV, S. E. MARKOVYCH, A. I. DOLMATOV.</b> STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF NI+AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +ZN COATINGS PRODUCED BY THE LOW PRESSURE COLD SPRAY TECHNOLOGY.....	186
<b>Е.В. ОШАРОВСКАЯ, Н.А. ПАТЛАЕНКО, В. И. СОЛОДКА.</b> ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СЕТОЧНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ЦИФРОВОГО ПОТОКА.....	190
<b>О.Б. В'ЮНЕНКО, А.В. ТОЛБАТОВ, С.В. АГАДЖАНОВА, О.Б. ШАНДИБА, В.А. ТОЛБАТОВ, С.В. ТОЛБАТОВ.</b> ПОБУДОВА СИСТЕМ МОНІТОРІНГУ, АНАЛІЗУ ТА ОЦІНКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ РЕГІОНАЛЬНОГО РІВНЯ ДЛЯ СИТУАЦІЙНИХ ЦЕНТРІВ АПК.....	194
<b>О.О. ШЕЛУХА.</b> ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ ДАНИХ В СИСТЕМАХ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	202

#### ПРЕЦИЗІЙНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<b>О. І. ЛАКТИОНОВ, А. М. СІЛЬВЕСТРОВ.</b> МОДЕЛЬ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ СПІВРОБІТНИКА, ЯК ФУНДАМЕНТАЛЬНА ОСНОВА МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ ФАХІВЦЯ ТЕХНІЧНОГО ПРОФІЛЮ.....	206
<b>Н.В. ЗАХАРЧЕНКО, М.М. ГАДЖИЕВ.</b> ФОРМИРОВАНИЕ КОДОВОГО МНОЖЕСТВА ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ОДНОГО БИТА С МАКСИМАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЕМКОСТЬЮ НАЙКВИСТОВОГО ЭЛЕМЕНТА.....	210
<b>О.В. КЛІЩ, О.В. ОГНЄВИЙ.</b> МЕТОД ВІДСЛІДКОВУВАННЯ МОБІЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ЗА ПЕРЕХОПЛЕНИМИ «ПРОБНИМИ» ПАКЕТАМИ ПІДКЛЮЧЕННЯ ДО WIFI.....	214
<b>С.И. ВЯТКИН, А.Н. РОМАНЮК, А.А. ДУДНИК.</b> АНИЗОТРОПНАЯ ФИЛЬТРАЦИИ ТЕКСТУРЫ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ.....	217
<b>Т.О. САВЧУК, А.В. КОЗАЧУК.</b> МАСШТАБУВАННЯ ХМАРНОГО ДОДАТКУ З ВИКОРИСТАННЯМ СИМУЛЯТОРА НАВАНТАЖЕННЯ ЙОГО РОБОТИ.....	222
<b>І.В. ТРОЦИШИН, Н.І. ТРОЦИШИНА, М.І. ЛИСИЙ.</b> НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ РАДІОСИГНАЛІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЗАСОБІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ З РАДІОКАНАЛАМИ БЕЗПЛОТНИХ РОЗВІДУВАЛЬНИХ СИСТЕМ.....	226

УДК 535.08; 681.7.08

В.Т. КОНДРАТОВ

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова, г. Киев

**ТЕОРИЯ ИЗБЫТОЧНЫХ И СВЕРХИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ:  
СВЕРХИЗБЫТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ  
РЕЗИСТОРОВ И РЕЗИСТИВНЫХ СЕНСОРОВ  
СООБЩЕНИЕ 1**

*В работе рассмотрено решение метрологической задачи сверхизбыточных измерений сопротивления резисторов и резистивных сенсоров в части получения не одного, а множества фундаментальных (или базовых) уравнений избыточных измерений при практическом использовании, коммутировании или переборе всех вариантов соединений трех резисторов —  $R_x$ ,  $R_{01}$  и  $R_{02}$  между собой и их параллельном подключении к входному резистору  $R_{вх}$  измерительного канала. Показана возможность определения параметров функции преобразования измерительного канала, его входного сопротивления, действительных значений нормированных по сопротивлению резисторов, погрешности вычислительной обработки данных и т.п.*

*Данная метрологическая задача решается при линейной функции преобразования измерительного канала. Описаны сущность метода сверхизбыточных измерений и его математические модели с учетом влияния входного сопротивления измерительного канала на конечный результат измерений. Приведены соответствующие уравнения избыточных измерений и техническое решение омметра, реализующего метод сверхизбыточных измерений.*

*В первом сообщении основное внимание уделено вопросу определения множества значений входного сопротивления измерительного канала.*

*Работа представляет интерес для магистров, специалистов и ученых, интересующихся сверхизбыточными измерениями величин разной физической природы.*

*Ключевые слова: сверхизбыточные измерения, резистивный сенсор, функция преобразования.*

V.T. KONDRATOV

V.M.Glushkov Institute of cybernetics of National academy of Science of Ukraine

**THE THEORY REDUNDANT AND SUPER-REDUNDANT MEASUREMENTS: SUPER-REDUNDANT  
MEASUREMENTS OF RESISTANCE OF RESISTORS AND RESISTIVE SENSORS  
THE MESSAGE 1**

*Abstract - In paper the decision of a problem of super-redundant measurements of resistance of resistors and resistive sensor controls regarding reception not one, but set fundamental (or base) the equations of redundant measurements is considered at practical use, commutation or search of all variants of connections of three resistors —  $R_x$ ,  $R_{02}$  and  $R_{01}$  among themselves and their parallel connection to the entrance resistor  $R_{вх}$  of the measuring channel.*

*Possibility of definition of parameters of function of transformation of the measuring channel, its entrance resistance, the valid values of resistor normalized by the value of resistance is shown, to an error of computing data processing, etc.*

*The given metrological problems solving at linear function of transformation of the measuring channel. The essence of a method of super-redundant measurements and its mathematical models taking into account influence of entrance resistance of the measuring channel on an end result of measurements are described. The corresponding equations of redundant measurements and the technical decision of the digital ohmmeter realizing a method of super-redundant measurements are resulted.*

*In the first message the basic attention is given a question of definition of set of values of entrance resistance of the measuring channel.*

*Work is of interest for masters, experts and scientists, the interested super-redundant measurements of quantities of the different physical nature.*

*Keywords: super-redundant measurements, a resistive sensor control, transformation function.*

**Введение**

О создании теории и методов избыточных измерений было заявлено автором в 2001 году [1]. Отдельные методы избыточных измерений величин разной физической природы были опубликованы в работах автора еще до защиты докторской диссертации, т.е. в 1986 – 2001 гг. Первая редакция теории избыточных измерений была опубликована в 2002 году [2]. Далее последовал период углубленной разработки теории и методов избыточных измерений. Некоторые из работ приведены в перечне литературы (см. [3 – 10]), а другие можно найти в Интернете и на сайте «<http://kondratov.com.ua>», раздел «главные труды 2013 ») и в работах [12, 13]. О создании теории сверхизбыточных измерений было заявлено автором в 2013 году и подана заявка на патент Украины по сверхизбыточным измерениям сопротивления резисторов и резистивных сенсоров, который был получен в 2015 году [11].

Сверхизбыточные или суперизбыточные измерения — это новейшее направление в теории избыточных измерений, развиваемого автором [11 – 13]. В XXI веке фундаментальная наука метрология получила новый качественный скачок в своем развитии. Одновременно со стратегией прямых измерений, стала развиваться стратегия избыточных и сверхизбыточных измерений. В то же время коллеги-метрологи

не спешат осваивать и развивать стратегию избыточных измерений.

Теория избыточных и сверхизбыточных измерений изучает как философские аспекты теории, так и методы и технические решения соответствующих средств измерений [11, 12]. Методы сверхизбыточных измерений отличаются от методов избыточных измерений дополнительным введением в используемый ряд однородных физических величин. За счет получения новой информации о состоянии параметров функции преобразования измерительного канала, достигается возможность получения конечного множества результатов измерений искомой физической величины, параметров измерительного канала и его функции преобразования. Это позволяет повысить точность определения действительного или (квази)истинного значения физической величины за счет дополнительной обработки и усреднения полученных данных.

В статье описывается сущность уникального по возможностям метода сверхизбыточных измерений сопротивления резистора или резистивного сенсора.

**Объект исследований** — процесс высокоточного измерения физических величин на основе стратегии избыточных и сверхизбыточных измерений.

**Предмет исследований** — метод сверхизбыточных (суперизбыточных) измерений сопротивления резистора или резистивного сенсора при линейной функции преобразования измерительного канала (ИК) с исключением влияния его входного сопротивления на конечный результат.

**Целью работы** является ознакомление ученых с сущностью и возможностями метода сверхизбыточных измерений сопротивления резистора или резистивного сенсора физических величин, обеспечивающего получение несколько десятков, сотен и даже тысяч результатов измерений при измерительном преобразовании трех резисторов, —  $R_x$ ,  $R_{01}$  и  $R_{02}$ , и их параллельном подключении к входному резистору  $R_{вх}$  ИК.

В работе показана возможность автоматического исключения аддитивной и мультипликативной составляющих систематической погрешности измерения сопротивления исследуемого резистора или резистивного сенсора, влияния входного сопротивления измерительного канала на результат измерения, возможность определения действительных значений входного сопротивления и значений параметров линейной функции преобразования измерительного канала, причем в количествах, необходимых и достаточных для статистической обработки с целью повышения прецизионности сверхизбыточных измерений.

#### Результаты исследований

*Сверхизбыточные измерения* — это процесс, включающий в себя [1]:

1) повторяющиеся ограниченное число раз ( $1, \dots, n$ ) измерительные преобразования расширенного ряда физических величин, закономерно связанных между собой по размерам, в том числе и с физическими величинами принятого размера;

2) усреднение (при многократных преобразованиях) преобразованных величин по «малому» или «большому»<sup>1</sup> кругу;

3) обработку их по одному или по статистически достоверной совокупности априори полученных  $n$  уравнений избыточных измерений искомой величины, параметров функции преобразования измерительного канала и его характеристик;

4) усреднение ансамбля результатов избыточных измерений с использованием традиционных и нетрадиционных методов<sup>2</sup>;

5) оценку текущего состояния измерительного канала используемого средства избыточных измерений (метрологических характеристик и метрологической исправности) на протяжении всего времени его эксплуатации;

6) структуризацию уравнений избыточных измерений и их модификацию;

7) параллельную обработку показателей модифицированной структуры уравнения избыточных измерений (или уравнения числовых значений);

8) представление окончательной формы записи уравнения избыточных измерений (или уравнения числовых значений) в виде уравнения связи значения искомой физической величины с нормированной по значению величиной через безразмерный коэффициент пропорциональности;

9) анализ погрешностей вычислительной обработки и усреднения данных и выдачу рекомендаций по их уменьшению;

10) переосмысление модели объекта исследований и модификацию метода сверхизбыточных измерений в случае получения результатов не достаточно высокого качества.

#### Задачи научных исследований

В рамках теории сверхизбыточных измерений развиваются и решаются следующие задачи научных исследований:

1) изучение соответствия реальной и принятой или приписанной объекту исследований математической модели, взаимосвязей ее параметров между собой и с параметрами окружающей среды;

2) изучение соответствия реальной и принятой математической модели функции преобразования измерительного канала;

3) изучение возможностей сверхизбыточных измерений при увеличении количества измеряемых физических величин в используемом ряде, размеры которых связаны между собой по определенному закону

<sup>1</sup> в каждом такте или по истечении  $n$  циклов

<sup>2</sup> развиваются автором

(по закону арифметической и/или геометрической прогрессии, по законам соединения элементов пассивной электрической цепи и другими законами) с целью получения дополнительной информации об искомой физической величине, о состоянии измерительного канала средства измерения и о конечном множестве уравнений избыточных измерений;

4) изучение преимущества и эффективности замены операции усреднения во времени операцией усреднения по ансамблю данных при решении задач повышения прецизионности (сверх)избыточных измерений;

5) изучение возможностей сверхизбыточных измерений при решении метрологических задач с использованием стратегии преобразования системы координат;

6) создание основ теории структурного анализа уравнений избыточных измерений и их ансамблей;

7) анализ и исследование алгоритмов параллельной обработки объединений числовых значений физических величин и коэффициентов.

8) метрологическое обеспечение процесса обработки данных путем:

а) использования правил округления значений показателей объединений взаимосвязанных между собой физических величин и коэффициентов;

б) подбора пар нормированных по значению физических величин, имеющих равные по значению, но противоположные по знаку погрешности воспроизведения этих величин;

в) осуществления равноточных измерительных преобразований рядов входных физических величин и др.

*Базовые (независимые) и зависимые уравнения избыточных измерений*

*Базовыми* будем называть уравнения избыточных измерений, которые обеспечивают автоматическое исключение влияния на конечный результат всех параметров линейной функции преобразования измерительного канала (ИК).

Базовые уравнения избыточных измерений описывают фундаментальные закономерные связи между однородными физическими величинами, константами и коэффициентами и характеризуют состояние измерительного канала в дискретные моменты времени при априори выбранных входных воздействиях. При этом достигается инвариантность результата избыточных измерений к изменениям параметров функции преобразования ИК при воздействиях на него дестабилизирующих факторов.

*Зависимые уравнения избыточных измерений* — это уравнения избыточных измерений, обеспечивающие автоматическое исключение влияния на конечный результат всех параметров линейной функции преобразования измерительного канала ИК, но не исключающие влияния, например, его входного сопротивления или какой-либо иного параметра по причине неполноты используемых рядов входных физических величин. При этом предполагается, что влияющая физическая величина может быть определена путем введения дополнительного такта измерения или измерительного преобразования еще одной входной физической величины и решения уточненной математической модели процесса избыточных измерений, т.е. новой системы уравнений величин.

Установлено, что при принятой математической модели, описывающей сверхизбыточные состояния измерительного канала в дискретные моменты времени, не сложно получить множество (несколько десятков, сотен, тысяч и даже десятки тысяч) уравнений избыточных измерений.

Рассмотрим сущность метода сверхизбыточных измерений на примере работы цифрового омметра, функциональная схема которого приведена на рисунке.

Сверхизбыточные измерения — это избыточные измерения при расширенном числе измеряемых входных физических величин и нескольких дискретно изменяемых значений параметров функции преобразования измерительного канала с сенсором (режимов работы измерительного канала).

При сверхизбыточных измерениях оптимальное число резисторов, нормированных по значению сопротивления и которое необходимо для проведения избыточных измерений, увеличивается на один, два или более резисторов. Кроме того, сверхизбыточность может быть достигнута как путем дискретного изменения чувствительности измерительного канала, так и путем изменения режима работы цифрового омметра, например, путем использования не одного, а двух нормированных по значению токов, протекающих через измеряемые резисторы непосредственно или через их электрические соединения.

В работе приведено решение следующих задач: 1) высокоточное определение сопротивления искомого резистора или резистивного сенсора; 2) высокоточное определение значений входного сопротивления измерительного канала; 3) определение коэффициента усиления измерительного канала и смещения функции преобразования; 4) определение погрешности вычисления действительных значений образцовых резисторов; 5) получение ограниченного множества уравнений избыточных измерений при практическом использовании, коммутировании и переборе всех вариантов соединений трех резисторов —  $R_x$ ,  $R_{01}$  и  $R_{02}$  между собой и их параллельном подключении к входному резистору  $R_{вх}$  ИК.

На рисунке используется следующая аббревиатура функциональных блоков и элементов: ФФВ — формирователь физических величин; Кл1, Кл2, Кл3 — первый, второй и третий ключи;  $R_{01}$  и  $R_{02}$  — первый и второй резисторы с нормированными значениями сопротивлений ( $\{R_{01}\} \neq \{R_{02}\}$ );  $R_x$  — исследуемый резистор с неизвестным значением сопротивления; АП1, АП2 и АП3 — первый, второй и третий автоматические переключатели;  $R_{вх}$  — входное сопротивление измерительного канала неизвестного значения;  $R_d$  — дополнительный резистор; ИК — измерительный канал с линейной функцией преобразования, включающий в себя измерительный преобразователь ИП и суммирующее устройство СУ;

ИТ — источник стабильного тока; МК — микроконвертор; ЖКИ — жидкокристаллический индикатор; КЛ — клавиатура; ОШ — общая шина.

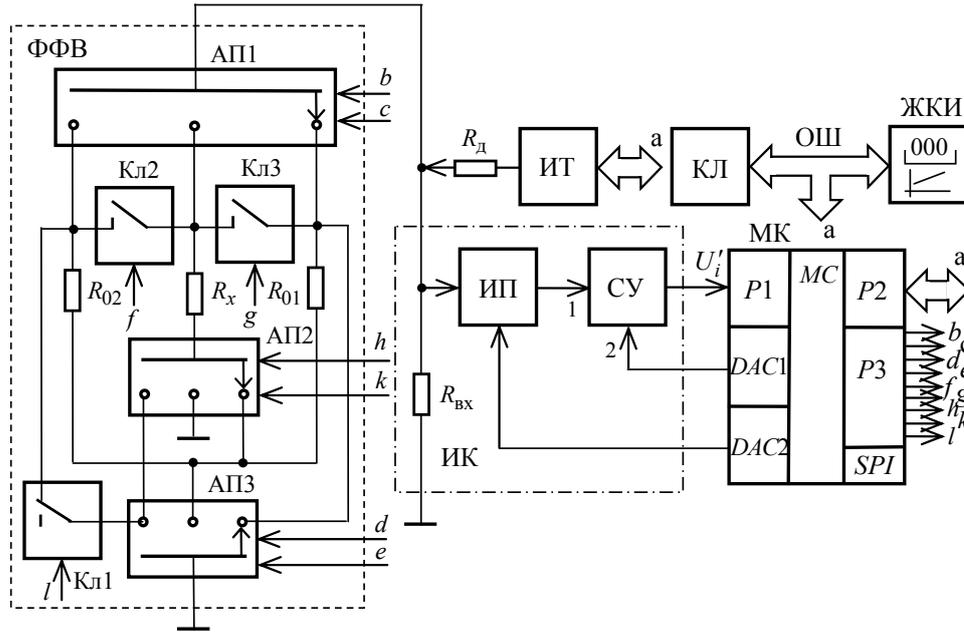


Рисунок. Функциональная схема цифрового омметра с расширенными функциональными возможностями

В цифровом омметре реализован метод сверхизбыточных измерений, при котором, вместо трех, используется двенадцать физических величин (сопротивлений), подлежащих измерительному преобразованию.

Предположим, что общая функция преобразования измерительного канала ИК имеет вид

$$U'_x = k'_{yc} I'_0 R_x + \Delta U' \quad (1)$$

где  $k'_{yc}$  — коэффициент усиления ИК ( $k'_{yc} = k_{yc}(1 + \gamma)$ ,  $k_{yc}$  — коэффициент усиления ИК на момент ввода омметра в эксплуатацию после изготовления или поверки);  $\Delta U'$  — напряжение, равное смещению функции преобразования и дрейфа нуля (аддитивной составляющей погрешности);  $I'_0$  — реальный ток с учетом погрешности воспроизведения его мерой или источником тока.

В основу описываемого метода сверхизбыточных измерений положено измерительное преобразование двенадцати физических величин:  $R_1 (\{R_1\} = \{R_{00}\} = 0)$ ,  $R_2 (\{R_2\} = \{R_{01}\})$ ,  $R_3 (\{R_3\} = \{R_{02}\})$ ,  $R_4 (\{R_4\} = \{R_{01}\} + \{R_{02}\})$ ,  $R_5 (\{R_5\} = \{R_{01}\} \{R_{02}\} / (\{R_{01}\} + \{R_{02}\}))$ ,  $R_6 (\{R_6\} = \{R_x\})$ ,  $R_7 (\{R_7\} = \{R_x\} + \{R_{01}\})$ ,  $R_8 (\{R_8\} = \{R_x\} \{R_{01}\} / (\{R_x\} + \{R_{01}\}))$ ,  $R_9 (\{R_9\} = \{R_x\} + \{R_{02}\})$ ,  $R_{10} (\{R_{10}\} = \{R_x\} \{R_{02}\} / (\{R_x\} + \{R_{02}\}))$ ,  $R_{11} (\{R_{11}\} = \{R_{01}\} + \{R_{02}\} + \{R_{bx}\})$  и  $R_{12} (\{R_{12}\} = \{R_x\} \{R_{01}\} \{R_{02}\} / [\{R_x\} (\{R_{01}\} + \{R_{02}\}) + \{R_{01}\} \{R_{02}\}])$  при значении стабильного тока —  $I_{01}$ . Эти величины получают с помощью формирователя физических величин ФФВ (см. рисунок). Последний включает в себя три резистора, три ключа и три автоматических переключателя, соединенные, как показано на рисунке. При этом все резисторы подключаются параллельно входному резистору, что приводит к изменению результирующего сопротивления. Все это учитывается в данном методе.

Как будет показано ниже, данная совокупность физических величин обеспечивает широкие функциональные возможности метода в части получения не одного, а множества значений искомой физической величины и параметров функции преобразования измерительного канала. В результате их усреднения получают дополнительное повышение точности измерений.

Работа цифрового омметра состоит из 12-ти тактов измерительного преобразования сопротивлений приведенного ряда резисторов в напряжения с последующим аналого-цифровым преобразованием полученных значений напряжений в коды чисел. В 13-м такте осуществляется окончательная обработка результатов промежуточного преобразования физических величин. Часть полученных результатов, как правило, обрабатываются параллельно процессу измерительного преобразования сопротивлений резисторов при условии использования многоядерного микроконвертора МК.

Первые пять тактов выполняются с целью получения информации о состоянии измерительного канала ИК, в частности, о значениях параметров функции преобразования ИК, о сопротивлении входного резистора  $R_{bx}$ , о значении коэффициента усиления  $k'_{yc}$  измерительного преобразователя ИП и отклонении его значения от номинального  $k_{yc}$ , о дрейфе нуля ИК и т.д.

Следующие три такта направлены на определение значений искомого сопротивления при

измерительном преобразовании сопротивления резистора  $R_x$  при разных его соединениях с резисторами  $R_{01}$  и  $R_{Bx}$ . Девятый и десятый такты проводятся для определения сопротивления  $R_x$  при разных соединениях трех резисторов ( $R_x$ ,  $R_{02}$  и  $R_{Bx}$ ), а одиннадцатый и двенадцатый такты проводятся для оценки возможности определения значения искомого сопротивления резистора  $R_x$  в режиме подключения к входному резистору  $R_{Bx}$  последовательно или параллельно соединенных резисторов  $R_x$ ,  $R_{01}$  и  $R_{02}$ .

Система линейных уравнений величин, описывающая работу омметра в дискретные моменты времени, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} U'_1 &= k'_{yc} I'_{01} \frac{r_3 R_{Bx}}{r_3 + R_{Bx}} + \Delta U' = \Delta U' & U'_7 &= k'_{yc} I'_{01} \frac{(R_x + R_{01}) R_{Bx}}{(R_x + R_{01}) + R_{Bx}} + \Delta U', \\ U'_2 &= k'_{yc} I'_{01} \frac{R_{01} R_{Bx}}{R_{01} + R_{Bx}} + \Delta U', & U'_8 &= k'_{yc} I'_{01} R_{Bx} \frac{R_x R_{01}}{R_x R_{01} + R_{Bx} (R_x + R_{01})} + \Delta U', \\ U'_3 &= k'_{yc} I'_{01} \frac{R_{02} R_{Bx}}{R_{02} + R_{Bx}} + \Delta U', & U'_9 &= k'_{yc} I'_{01} \frac{(R_x + R_{02}) R_{Bx}}{(R_x + R_{02}) + R_{Bx}} + \Delta U', \\ U'_4 &= k'_{yc} I'_{01} \frac{(R_{01} + R_{02}) R_{Bx}}{R_{01} + R_{02} + R_{Bx}} + \Delta U', & U'_{10} &= k'_{yc} I'_{01} R_{Bx} \frac{R_x R_{02}}{R_x R_{02} + R_{Bx} (R_x + R_{02})} + \Delta U', \\ U'_5 &= k'_{yc} I'_{01} \frac{R_{01} R_{02} R_{Bx}}{R_{01} R_{Bx} + R_{02} R_{Bx} + R_{01} R_{02}} + \Delta U', & U'_{11} &= k'_{yc} I'_{01} \frac{(R_{01} + R_{02} + R_x) R_{Bx}}{R_{01} + R_{02} + R_x + R_{Bx}} + \Delta U', \\ U'_6 &= k'_{yc} I'_{01} \frac{R_x R_{Bx}}{R_x + R_{Bx}} + \Delta U', & U'_{12} &= k'_{yc} I'_{01} \frac{R_x R_{01} R_{02} R_{Bx}}{R_{02} R_{Bx} (R_{01} + R_x) + R_x R_{01} (R_{Bx} + R_{02})} + \Delta U'. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Все такты измерительного преобразования сопротивлений резисторов направлены на получение сверхизбыточной информации об искомом сопротивлении резистора  $R_x$  или резистивного сенсора. Это необходимо для доказательства возможности перехода от усреднения данных, полученных во времени, к усреднению множества данных, полученных по ансамблю (в пространстве) в результате комбинаторных объединений уравнений величин в подсистемы и решении последних относительно искомой физической величины.

Рассмотрим последовательность работы цифрового омметра во времени (по тактам). Отметим, что выбор нулевого или заданного значения тока осуществляется по команде с микроконвертора МК, поступающей через общую шину ОШ с выходов порта P2 на цифровые входы цифрууправляемого источника тока ИТ. В то же время на управляющие входы ключей Кл1, Кл2 и Кл3, автоматических переключателей АП1, АП2 и АП3 ФВВ поступают сигналы с выходов «b», ..., «l» порта P3 МК. Они обеспечивают коммутацию ключей и автоматических переключателей и получение указанных выше двенадцати резисторов с известными и неизвестными значениями сопротивлений. Последние обусловлены используемыми законами соединений элементов электрических цепей. Выход АП1 соединен с выходом ИТ через дополнительный резистор  $R_d$  и подключен ко входу измерительного преобразователя ИП с входным сопротивлением  $R_{Bx}$ . В каждом такте на выходе АП1 появляется напряжение (1), полученное в результате протекания тока  $I'_0$  через тот или иной резистор, кроме первого. Это напряжение с помощью встроенного в МК АЦП преобразуется в код числа. Обработка результатов измерительного преобразования сопротивлений резисторов осуществляется в арифметико-логическом устройстве МК. Отсчет результатов измерения производится с помощью жидкокристаллического индикатора ЖКИ, который, как и клавиатура КЛ, подключены к выходам порта P2 МК. С помощью клавиатуры КЛ осуществляется включение и выключение омметра, выбор режимов работы, связанных с реализацией части или всего метода сверхизбыточных измерений, выбор режима борьбы с помехами, с оповещением оператора, с типом сигнализации и т.п., а также с выбором той или иной сервисной программы.

В исходном положении, т.е. до начала измерительных преобразований, Кл1, Кл2 и Кл3, АП1, АП2 и АП3 находятся в положениях, указанных на рисунке. В результате вход измерительного канала ИК замыкается на земляную шину (см. рисунок). При нулевом значении смещения на ЖКИ отобразится информация о готовности омметра к проведению измерений. В противном случае, автоматически, по команде с МК, на второй вход СУ с выхода DAC1 поступает напряжение, которое компенсирует дрейф нуля до получения нулевого значения выходного напряжения ИК.

В первом такте входы ИК замкнуты на землю с помощью АП1 и АП3. На выходе ИК появляется напряжение  $U'_1$  (см. систему (2), первое уравнение величин), где  $r_3$  — близкое к нулю значение переходного сопротивления автоматического переключателя ( $r_3 \sim 0$  Ом), осуществляющего замыкание входа ИК на земляную шину.

Напряжение смещения  $U'_1$ , полученное при короткозамкнутом входе измерительного канала ИК, преобразуется в код числа

$$N_1 = \{S_0\} \{U'_1\} = \{S_0\} \left( k'_{yc} \{I'_0\} \frac{\{r_3\} \{R_{BX}\}}{\{r_3\} + \{R_{BX}\}} + \{\Delta U'\} \right) = \Delta N, \quad (3)$$

который запоминается в оперативной памяти МК.

При этом используются АЦП с линейной функцией преобразования. В (3) и в других уравнениях числовых значений фигурные скобки характеризуют числовые значения физических величин.

По команде с МК на выходе ИТ устанавливается значение тока  $I'_{01}$ . Во втором такте АПЗ устанавливается в среднее положение (см. рисунок). В результате ток  $I'_{01}$  от ИТ поступит на резистор  $R_{01}$ . На выходе ИК формируются напряжение  $U'_2$  (см. систему (2), второе уравнение величин). С помощью АЦП это напряжение преобразуется в код числа

$$N_2 = \{S_0\} \{U'_2\} = \{S_0\} k'_{yc} \{I'_{01}\} \frac{\{R_{01}\} \{R_{BX}\}}{\{R_{01}\} + \{R_{BX}\}} + \Delta N, \quad (4)$$

и запоминается в оперативной памяти МК.

Как правило, числовые значения  $N_1$  (3) и  $N_2$  (4) напряжений  $U'_1$  и  $U'_2$  используются, соответственно, для установки нуля выходного напряжения ИК и исходного (номинального) значения тока. Для это полученные числовые значения сравниваются с их номинальными значениями  $N_{01}$  и  $N_{02}$ , полученными при вводе цифрового омметра в эксплуатацию. В случае отклонения значений от номинальных, например, при жестких условиях эксплуатации цифрового омметра, осуществляется их автоматическая метрологическая самопроверка.

По результатам сравнения формируются соответствующие напряжения, которые с выходов DAC1 и DAC2 встроенных в МК ЦАП поступают, соответственно, на управляющий вход измерительного преобразователя ИП и второй вход суммирующего устройства СУ, изменяя, тем самым, значения крутизны (коэффициента усиления) и смещения функции преобразования ИК до номинальных значений.

В третьем такте, АП1 переводится в крайнее левое положение (см. рисунок). В результате ток  $I'_{01}$  от источника тока ИТ будет протекать через резистор  $R_{02}$ . На выходе ИК формируются напряжение  $U'_3$  (см. систему (2), третье уравнение величин). С помощью АЦП это напряжение преобразуется в код числа

$$N_3 = \{S_0\} \{U'_3\} = \{S_0\} k'_{yc} \{I'_{01}\} \frac{\{R_{02}\} \{R_{BX}\}}{\{R_{02}\} + \{R_{BX}\}} + \Delta N \quad (5)$$

и запоминается в оперативной памяти МК.

Решение подсистемы, состоящей из первого, второго и третьего уравнений величин (см. уравнений величин для  $U'_1$ ,  $U'_2$  и  $U'_3$  системы (2)) относительно  $R_{BX}$ , с учетом различных сочетаний уравнений величин, дает возможность получить четыре уравнения избыточных измерений входного сопротивления ИК (см. табл. 1):

Табл.1

Формализованная запись первых 4-х вариантов решения подсистем уравнений величин относительно $R_{BX}$	
(3-1)/(2-1); (3-1)/(3-2); (3-2)/(2-1); (3-2)/(3-1)	
№ п/п	Уравнения избыточных измерений входного сопротивления измерительного канала
1	$R_{BX} = R_{01} \left( k_1 - \frac{U'_3 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right) / \left( \frac{R_{01}}{R_{02}} \frac{U'_3 - U'_1}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right)$
2	$R_{BX} = R_{01} / \left( \frac{R_{02} - R_{01}}{R_{02}} \frac{U'_3 - U'_1}{U'_3 - U'_2} - k_1 \right)$
3	$R_{BX} = R_{02} \left( \frac{R_{01}}{R_{02} - R_{01}} \frac{U'_3 - U'_2}{U'_2 - U'_1} \right) / \left( \left( k_1 - \frac{R_{01}}{R_{02} - R_{01}} \frac{U'_3 - U'_2}{U'_2 - U'_1} \right) \right)$
4	$R_{BX} = R_{02} \left( \frac{R_{01}}{R_{02} - R_{01}} \frac{U'_3 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \right) / \left( k_1 - \frac{R_{02}}{R_{02} - R_{01}} \frac{U'_3 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \right)$

Числовые значения  $N_2$  (4), и  $N_3$  (5) напряжений  $U'_2$  и  $U'_3$  могут быть использованы, при необходимости, для контроля и установления нулевого значения выходного напряжения ИК и значения коэффициента усиления ИК. Решая подсистему, состоящую из второго и третьего уравнений величин (см. систему линейных уравнений величин (2)), получим уравнение избыточных измерений коэффициента усиления ИК, при заданном значении тока  $I'_{01}$ , в виде:

$$k'_{yc} = \frac{U'_2 - U'_3}{I'_{01} R_{Bx}} \cdot \frac{(R_{01} + R_{Bx})(R_{01} + R_{Bx})}{R_{Bx}(R_{01} - R_{02})}. \quad (6)$$

Соответствующее уравнение числовых значений имеет вид:

$$k'_{yc} = \frac{N_2 - N_3}{\{S_0\} \{I'_{01}\} \{R_{Bx}\}} \cdot \frac{(\{R_{01}\} + \{R_{Bx}\})(\{R_{02}\} + \{R_{Bx}\})}{\{R_{Bx}\}(\{R_{01}\} - \{R_{02}\})}, \quad (7)$$

где  $R_{Bx}$  и  $\{R_{Bx}\}$  определяются согласно уравнениям измерений, приведенным в табл. 1 и табл.2.

Решение подсистемы из трех линейных уравнений величин (см. (2), первое, второе, третье), относительно нормированных по значению резисторов  $R_{01}$  и  $R_{02}$ , дает возможность определять действительные значения сопротивлений резисторов  $R_{01}$  и  $R_{02}$  (при формализованном описании процесса обработки — (3-1)/(2-1); (3-2)/(2-1); (3-2)/(3-1)) согласно уравнениям избыточных измерений:

$$R'_{01} = \frac{R_{Bx}}{\left[ \frac{U'_3 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \left( k_1 + \frac{R_{Bx}}{R_{02}} \right) - k_1 \right]} \quad (8)$$

и

$$R'_{02} = R_{01} R_{Bx} \frac{U'_3 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \left/ \left( (R_{Bx} + R_{01}) - \frac{U'_3 - U'_1}{U'_2 - U'_1} R_{01} \right) \right., \quad (9)$$

$$R'_{01} = \frac{R_{02}}{\frac{U'_3 - U'_2}{U'_2 - U'_1} \left( \frac{R_{02}}{R_{Bx}} + k_1 \right) + k_1} \quad (10)$$

и

$$R'_{02} = R_{01} \left( \frac{U'_3 - U'_2}{U'_2 - U'_1} + k_1 \right) \left/ \left( k_1 - \frac{R_{01}}{R_{Bx}} \frac{U'_3 - U'_2}{U'_2 - U'_1} \right) \right.; \quad (11)$$

$$R'_{01} = R_{02} \left( k_1 + \frac{U'_3 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \right) \left/ \left( \frac{U'_3 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \frac{R_{02}}{R_{Bx}} + k_1 \right) \right. \quad (12)$$

и

$$R'_{02} = \frac{R_{01}}{\left[ k_1 + \frac{U'_3 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \left( k_1 - \frac{R_{01}}{R_{Bx}} \right) \right]}, \quad (13)$$

где  $R_{Bx}$  определяется по выше- или нижеприведенным уравнениям избыточных измерений,

В четвертом такте АП1 устанавливается в исходное положение, указанное на рисунке, КлЗ — в положение, противоположное указанному на рисунке, а АП2 и АП3 — в крайние левые положения. В результате ток  $I'_{01}$  потечет через последовательно соединенные резисторы  $R_{01}$  и  $R_{02}$ , подключенные параллельно с резисторами  $R_x$  и  $R_{Bx}$ . На выходе ИК появится напряжение  $U'_4$  (см. систему (2), девятое уравнение величин), которое преобразуется с помощью АЦП в код числа

$$N_4 = \{S_0\} k'_{yc} \{I'_{01}\} \frac{(\{R_{01}\} + \{R_{02}\}) \{R_{Bx}\}}{\{R_{01}\} + \{R_{02}\} + \{R_{Bx}\}} + \Delta N. \quad (14)$$

Решение подсистем, полученных в результате сочетания по три из четырех уравнений величин (см. уравнений величин для  $U'_1$ ,  $U'_2$ ,  $U'_3$  и  $U'_4$  системы (2)) относительно  $R_{Bx}$ , дает возможность получить еще 15-ь вариантов уравнений избыточных измерений входного сопротивления ИК (табл. 2, формализованная запись 15-и вариантов решения подсистем уравнений величин и сами уравнения избыточных измерений) и соответствующих уравнений числовых значений.

Особенностью приведенных в табл. 1 и табл. 2 уравнений избыточных измерений входного

сопротивления  $R_{\text{вх}}$  является независимость результата от параметров функции преобразования ИК и от нормированного значения тока, протекающего через резисторы. Соответствующие уравнения числовых значений используются для высокоточного определения входного сопротивления измерительного канала.

Табл.2

Формализованная запись 15-ти вариантов решения подсистем уравнений величин относительно $R_{\text{вх}}$	
(4-1)/(2-1); (4-1)/(3-1); (4-1)/(3-2); (4-1)/(4-2); (4-1)/(4-3); (4-2)/(2-1); (4-2)/(3-1); (4-2)/(3-2); (4-2)/(4-1); (4-2)/(4-3); (4-3)/(2-1); (4-3)/(3-1); (4-3)/(3-2); (4-3)/(4-1); (4-3)/(4-2);	
1	2
№ п/п	Уравнения избыточных измерений входного сопротивления измерительного канала
1	$R_{\text{вх}} = R_{01} \left( \frac{U'_4 - U'_1}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right) / \left( k_1 - \frac{R_{01}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right)$
2	$R_{\text{вх}} = R_{02} \left( \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_1} - k_1 \right) / \left( k_1 - \frac{R_{02}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_1} \right)$
3	$R_{\text{вх}} = \frac{(R_{01} + R_{02}) \left( k_1 - \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_2} \right)}{k_2 \left( \frac{R_{02} - R_{01}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_2} - k_1 \right)} \pm \sqrt{\left[ \frac{(R_{01} + R_{02}) \left( k_1 - \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_2} \right)}{k_2 \left( \frac{R_{02} - R_{01}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_2} - k_1 \right)} \right]^2 + \frac{R_{01} R_{02}}{\left( \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_2} \frac{R_{02} - R_{01}}{R_{01} + R_{02}} - k_1 \right)}}$
4	$R_{\text{вх}} = R_{01} / \left( \frac{R_{02}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_4 - U'_2} - k_1 \right)$
5	$R_{\text{вх}} = \frac{R_{01} \left( k_2 \frac{R_{02}}{R_{01}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_4 - U'_3} \right)}{\frac{R_{01}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_4 - U'_3} - k_1} \pm \sqrt{\left[ \frac{R_{01} \left( k_2 \frac{R_{02}}{R_{01}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_4 - U'_3} \right)}{\frac{R_{01}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_4 - U'_3} - k_1} \right]^2 + \frac{R_{02} R_{02}}{\left( \frac{R_{01}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_4 - U'_3} - k_1 \right)}}$
6	$R_{\text{вх}} = \left( (R_{01} + R_{02}) \frac{U'_4 - U'_2}{U'_2 - U'_1} \frac{R_{01}}{R_{02}} \right) / \left( k_1 - \frac{R_{01}}{R_{02}} \frac{U'_4 - U'_2}{U'_2 - U'_1} \right)$
7	$R_{\text{вх}} = R_{02} \frac{k_1 - \frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \left( k_2 \frac{R_{01}}{R_{02}} + k_1 \right)}{\frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_1} - k_1} \pm \sqrt{\left[ \frac{k_1 - \frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \left( k_2 \frac{R_{01}}{R_{02}} + k_1 \right)}{\frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_1} - k_1} \right]^2 - \frac{R_{01} (R_{01} + R_{02}) \frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_1}}{\frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_1} - k_1}}$
8	$R_{\text{вх}} = R_{02} \left( \frac{(R_{02}^2 - R_{01}^2) \frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_2} - k_1}{R_{02}^2} \right) / \left( \frac{R_{01} - R_{02}}{R_{02}} \frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_2} + k_1 \right)$
9	$R_{\text{вх}} = \frac{(R_{01} + R_{02}) \left( k_1 - \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_1} \frac{k_2 R_{01} + R_{02}}{R_{02}} \right)}{k_2 \left( \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_1} \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}} - k_1 \right)} \pm \sqrt{\left[ \frac{(R_{01} + R_{02}) \left( k_1 - \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_1} \frac{k_2 R_{01} + R_{02}}{R_{02}} \right)}{k_2 \left( \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_1} \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}} - k_1 \right)} \right]^2 - R_{01} \frac{\frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_1} \frac{(R_{01} + R_{02})^2}{R_{02}}}{\frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_1} \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}} - k_1}}$
10	$R_{\text{вх}} = \frac{R_{02} - \left( \frac{R_{01}^2}{R_{02}} + \frac{R_{01}}{k_2} \right) \cdot \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_3}}{\frac{R_{01}}{R_{02}} \cdot \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_3} - k_1} \pm \sqrt{\left[ \frac{R_{02} - \left( \frac{R_{01}^2}{R_{02}} + \frac{R_{01}}{k_2} \right) \cdot \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_3}}{\frac{R_{01}}{R_{02}} \cdot \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_3} - k_1} \right]^2 + R_{02} R_{02} \frac{k_1 - \frac{R_{01} R_{01}}{R_{02} R_{02}} \cdot \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}} \cdot \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_3}}{\frac{R_{01}}{R_{02}} \cdot \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_3} - k_1}}$

1	2
11	$R_{\text{BX}} = R_{01} \frac{k_1 - \frac{k_2 R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_2 - U'_1}}{k_2 \left( \frac{U'_4 - U'_3}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right)} \pm R_{01} \sqrt{\left[ \frac{k_1 - \frac{k_2 R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_2 - U'_1}}{\frac{U'_4 - U'_3}{U'_2 - U'_1} - k_1} \right]^2 - \frac{R_{02}^2}{R_{01}^2} \frac{\frac{U'_4 - U'_3}{U'_2 - U'_1}}{\frac{U'_4 - U'_3}{U'_2 - U'_1} - k_1}}$
12	$R_{\text{BX}} = \frac{k_1 - \frac{k_2 R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_1}}{\frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_1} - k_1} \pm \sqrt{\left[ \frac{k_1 - k_2 \frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_1}}{\frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_1} - k_1} \right]^2 + R_{02} R_{02} \frac{\frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_1}}{k_1 - \frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_1}}}$
13	$R_{\text{BX}} = R_{02} \left[ \frac{R_{01}}{R_{02}} - \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_2} \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} - k_1 \right) \right] / \left[ \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_2} \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} - k_1 \right) - k_1 \right]$
14	$R_{\text{BX}} = R_{01} \frac{\frac{R_{01} + R_{02}}{k_2} \left( k_1 - k_2 \frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_1} \right)}{(R_{01} + R_{02}) \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_1} - R_{01}} \pm \sqrt{\left[ \frac{\frac{R_{01} + R_{02}}{k_2} \left( k_1 - k_2 \frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_1} \right)}{(R_{01} + R_{02}) \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_1} - R_{01}} \right]^2 - \frac{\frac{R_{02}^2}{R_{01}^2} \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_1}}{R_{01} (R_{01} + R_{02}) \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_1} - R_{01}}}$
15	$R_{\text{BX}} = \frac{\left( R_{01} + \frac{R_{02}}{k_2} \right) - R_{02} \frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_2}}{\frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_2} - k_1} \pm \sqrt{\left[ \frac{\left( R_{01} + \frac{R_{02}}{k_2} \right) - R_{02} \frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_2}}{\frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_2} - k_1} \right]^2 - R_{02}^2 \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_2} - \frac{R_{01}^2}{R_{02}^2} \frac{R_{01}}{R_{02}} \right)}$

По окончании четвертого такта могут быть определены действительные значения резисторов  $R_{01}$  и  $R_{02}$  или отношение действительных значений этих резисторов путем приравнивая той или иной пары уравнений избыточных измерений входного сопротивления, например, первого и второго (см. табл.2). В результате получим уравнение избыточных измерений в неявном виде:

$$R_{01} = R_{02} \frac{\left( \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_1} - k_1 \right) / \left( k_1 - \frac{R_{02}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_1} \right)}{\left( \frac{U'_4 - U'_1}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right) / \left( k_1 - \frac{R_{01}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right)}, \quad (15)$$

а

$$R_{02} = R_{01} \frac{\left( \frac{U'_4 - U'_1}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right) / \left( k_1 - \frac{R_{01}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right)}{\left( \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_1} - k_1 \right) / \left( k_1 - \frac{R_{02}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_1} \right)}. \quad (16)$$

или в виде уравнений числовых значений

$$\{R_{01}\} = \{R_{02}\} \frac{\left( \frac{N_4 - N_1}{N_3 - N_1} - 1 \right) / \left( 1 - \frac{\{R_{02}\}}{\{R_{01}\} + \{R_{02}\}} \frac{N_4 - N_1}{N_3 - N_1} \right)}{\left( \frac{N_4 - N_1}{N_2 - N_1} - 1 \right) / \left( 1 - \frac{\{R_{01}\}}{\{R_{01}\} + \{R_{02}\}} \frac{N_4 - N_1}{N_2 - N_1} \right)} \quad (17)$$

и

$$\{R_{02}\} = \{R_{01}\} \frac{\left(\frac{N_4 - N_1}{N_2 - N_1} - 1\right) \left/ \left(1 - \frac{\{R_{01}\}}{\{R_{01}\} + \{R_{02}\}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_2 - U'_1}\right)}{\left(\frac{N_4 - N_1}{N_3 - N_1} - 1\right) \left/ \left(1 - \frac{\{R_{02}\}}{\{R_{01}\} + \{R_{02}\}} \frac{N_4 - N_1}{N_3 - N_1}\right)} \right. \quad (18)$$

Решение уравнений числовых значений (17) и (18) осуществляется путем перебора числовых значений сопротивления  $\{R_{01}\}$  ( $\{R_{02}\}$ ) при заданном значении  $\{R_{02}\}$  ( $\{R_{01}\}$ ). Момент равенства числовых значений правой и левой частей равенств (17) и (18) соответствует искомому значению сопротивления.

Комбинируя разные пары уравнений избыточных измерений можно получить ансамбль более, чем из 1000 данных.

Погрешность вычисления (отклонение результата от номинального значения) может быть определена по уравнениям измерений:

$$\overline{\Delta_{B1}} = \overline{R'_{01}} - R_{01} \quad (19)$$

и

$$\overline{\Delta_{B2}} = \overline{R'_{02}} - R_{02} \quad (20)$$

где  $\overline{R'_{01}}$  и  $\overline{R'_{02}}$  — усредненные по значениям сопротивления резисторов, при условии, что объемы вычислений сопротивлений резисторов  $R_{01}$  и  $R_{02}$ ,  $R_x$  и  $R_{Bx}$  равны или близки между собой по количеству операций.

В пятом такте, по команде с МК, АПЗ устанавливается в среднее положение, а ключи Кл2 и Кл3 — в замкнутое положение. При прохождении тока  $I'_{01}$  через параллельно соединенные резисторы  $R_{01}$ ,  $R_{02}$  и  $R_{Bx}$  на выходе ИК формируются падение напряжения  $U'_5$ . Полученное падение напряжения преобразуется в код числа

$$N_5 = \{S_0\} \{U'_5\} = \{S_0\} k'_{yc} \{I'_{01}\} \frac{\{R_{01}\} \{R_{02}\} \{R_{Bx}\}}{\{R_{01}\} \{R_{Bx}\} + \{R_{02}\} \{R_{Bx}\} + \{R_{01}\} \{R_{02}\}} + \Delta N \quad (21)$$

и запоминается.

Впервые в мире установлено, что по результатам пяти тактов измерительного преобразования можно определить, дополнительно к предыдущим 15-ти, еще 36 значений входного сопротивления измерительного канала. Формализованная запись 36-ти вариантов процедур обработки подсистем уравнений величин приведена в табл. 3 (через цифровые обозначения уравнений номера величин, приведенных в (2)). В табл. 1 приведены также все 36 разновидностей уравнений избыточных измерений входного сопротивления.

Табл.3

Формализованная запись 36-ти вариантов решения подсистем уравнений величин относительно $R_{Bx}$	
(5-1)/(2-1); (5-1)/(3-1); (5-1)/(3-2); (5-1)/(4-1); (5-1)/(4-2); (5-1)/(4-3); (5-1)/(5-2); (5-1)/(5-3); (5-1)/(5-4); (5-2)/(2-1); (5-2)/(3-1); (5-2)/(3-2); (5-2)/(4-1); (5-2)/(4-2); (5-2)/(4-3); (5-2)/(5-1); (5-2)/(5-3); (5-2)/(5-4); (5-3)/(2-1); (5-3)/(3-1); (5-3)/(3-2); (5-3)/(4-1); (5-3)/(4-2); (5-3)/(4-3); (5-3)/(5-1); (5-3)/(5-2); (5-3)/(5-4); (5-4)/(2-1); (5-4)/(3-1); (5-4)/(3-2); (5-4)/(4-1); (5-4)/(4-2); (5-4)/(4-3); (5-4)/(5-1); (5-4)/(5-2); (5-4)/(5-3).	
1	2
№ п/п	Уравнения избыточных измерений входного сопротивления измерительного канала
1	$R_{Bx} = R_{01} \left( \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right) \left/ \left( k_1 - \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right) \right.$
2	$R_{Bx} = R_{01} R_{02} \left( \frac{U'_5 - U'_1}{U'_3 - U'_1} - k_1 \right) \left/ \left( R_{01} - (R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_1}{U'_3 - U'_1} \right) \right.$
3	$R_{Bx} = \sqrt{\left[ \frac{\left( \frac{U'_5 - U'_1}{U'_3 - U'_2} (R_{02} - R_{01}) - (R_{02} + R_{01}) \right)^2}{\frac{k_1}{k_2} \left( k_1 - \frac{U'_5 - U'_1}{U'_3 - U'_2} \frac{R_{02}^2 - R_{01}^2}{R_{01} R_{02}} \right)} \right]} + \frac{R_{01} R_{02}}{\left( \frac{U'_5 - U'_1}{U'_3 - U'_2} \frac{R_{02}^2 - R_{01}^2}{R_{01} R_{02}} - k_1 \right)} + \frac{\left( \frac{U'_5 - U'_1}{U'_3 - U'_2} (R_{02} - R_{01}) - (R_{02} + R_{01}) \right)}{\frac{k_1}{k_2} \left( k_1 - \frac{U'_5 - U'_1}{U'_3 - U'_2} \frac{R_{02}^2 - R_{01}^2}{R_{01} R_{02}} \right)}$

1	2
4	$R_{\text{BX}} = R_{01} \left( k_1 - \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_1} \right) / \left( \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}} \left[ \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_1} - \frac{R_{01} R_{02}}{(R_{01} + R_{02})^2} \right] \right)$
5	$R_{\text{BX}} = \frac{R_{02} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_2} - (R_{01} + R_{02} + R_{01})}{\frac{k_1}{k_2} - \frac{R_{02}}{R_{01}} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_2}} \pm \sqrt{\left[ \frac{R_{02} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_2} - (R_{01} + R_{02} + R_{01})}{\frac{k_1}{k_2} - \frac{R_{02}}{R_{01}} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_2}} \right]^2 - \frac{(R_{01} + R_{02}) R_{01}}{k_1 - k_2} \frac{R_{02}}{R_{01}} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_2}}$
6	$R_{\text{BX}} = R_{02} \left( R_{\text{BX}} \left( k_2 - \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_3} \right) \right) / \left( \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{01}} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_3} - \frac{R_{02}}{R_{01}} \right)$
7	$R_{\text{BX}} = R_{01} / \left( \frac{R_{01}}{R_{02}} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_5} - k_1 \right)$
8	$R_{\text{BX}} = R_{02} / \left( \frac{U'_5 - U'_1}{U'_3 - U'_5} \frac{R_{02}}{R_{01}} - k_1 \right)$
9	$R_{\text{BX}} = (R_{01} + R_{02}) / \left[ \left( \frac{R_{01}}{R_{02}} + \frac{R_{02}}{R_{01}} + k_1 \right) \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_5} - k_1 \right]$
10	$R_{\text{BX}} = \frac{R_{01} R_{01} \left( \frac{U'_5 - U'_2}{U'_2 - U'_1} + k_1 \right)}{(R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_1 - U'_2} - R_{01}} \pm \sqrt{R_{01}^2 \frac{\left( \frac{U'_5 - U'_2}{U'_2 - U'_1} + k_1 \right)}{(R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_1 - U'_2} - R_{01}} - R_{01}^2 \frac{R_{02} \frac{U'_5 - U'_2}{U'_2 - U'_1}}{(R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_2 - U'_1} + R_{01}}}$
11	$R_{\text{BX}} = \frac{R_{02} \left( \frac{U'_5 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \frac{k_2 R_{02} + R_{01}}{R_{01}} + k_1 \right)}{k_2 \left( k_1 - \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} + \frac{R_{02}^2}{R_{01}^2} \right) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \right)} \pm \sqrt{\frac{R_{02} \left( \frac{U'_5 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \frac{k_2 R_{02} + R_{01}}{R_{01}} + k_1 \right)}{k_2 \left( k_1 - \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} + \frac{R_{02}^2}{R_{01}^2} \right) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \right)} - \frac{R_{02}^2 \frac{U'_5 - U'_2}{U'_3 - U'_1}}{\left( \frac{R_{02}}{R_{01}} + \frac{R_{02}^2}{R_{01}^2} \right) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_3 - U'_1} - k_1}}$
12	$R_{\text{BX}} = R_{02} \left( k_1 + \frac{R_{02} - R_{01}}{R_{01}} \frac{U'_5 - U'_2}{U'_3 - U'_2} \right) / \left( k_1 - \frac{R_{02}^2 - R_{01}^2}{R_{01} R_{01}} \frac{U'_5 - U'_2}{U'_3 - U'_2} \right)$
13	$R_{\text{BX}} = \frac{(R_{01} + R_{02}) \left( k_1 + k_2 \frac{R_{02}}{R_{01}} \right) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_1} - k_1}{k_2 (R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_1} - R_{01} R_{01} - k_2} \pm \sqrt{\left[ \frac{(R_{01} + R_{02}) \left( k_1 + k_2 \frac{R_{02}}{R_{01}} \right) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_1} - k_1}{k_2 (R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_1} - R_{01} R_{01} - k_2} \right]^2 + \frac{R_{02} (R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_1}}{(R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_1} - R_{01} R_{01} - k_1}}$
14	$R_{\text{BX}} = \left( R_{01} + R_{02} \left[ k_1 + \frac{R_{02}}{R_{01}} \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_2} \right] \right) / \left( \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} + \frac{R_{02}^2}{R_{01}^2} \right) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_2} - k_1 \right)$
15	$R_{\text{BX}} = \sqrt{\left[ \frac{R_{01} \left( k_2 R_{02} + k_1 \right) \left( \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_3} + k_1 \right)}{k_2 (R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_3} + R_{01}} \right]^2 - R_{01} R_{02} \frac{R_{01} \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_3} + (R_{01} + R_{02})}{(R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_3} + R_{01}} - R_{01} \frac{(k_2 R_{02} + k_1) \left( \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_3} + k_1 \right)}{k_2 (R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_3} + R_{01}}}$
16	$R_{\text{BX}} = R_{02} \frac{U'_2 - U'_5}{U'_5 - U'_1} / \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} \frac{U'_5 - U'_2}{U'_5 - U'_1} + k_1 \right)$

1	2
17	$R_{\text{BX}} = R_{02} \left( k_1 - \frac{U'_5 - U'_2}{U'_5 - U'_3} \frac{R_{02}}{R_{01}} \right) / \left( \frac{R_{02}^2}{R_{01}^2} \frac{U'_5 - U'_2}{U'_5 - U'_3} - k_1 \right)$
18	$R_{\text{BX}} = (R_{01} + R_{02}) \left[ k_1 - \left( k_1 + \frac{R_{02}^2}{R_{01}(R_{01} + R_{02})} \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_2}{U'_5 - U'_4} \right] / \left( k_1 + \frac{R_{02}}{R_{01}} + \frac{R_{02}^2}{R_{01}^2} \cdot \frac{U'_5 - U'_2}{U'_5 - U'_4} - k_1 \right)$
19	$R_{\text{BX}} = R_{01} \left( k_1 + \frac{R_{02} - R_{01}}{R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_2} \right) / \left( k_1 - \frac{R_{02}^2 - R_{01}^2}{R_{02}^2} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_2} \right)$
20	$R_{\text{BX}} = \frac{\frac{R_{01}}{k_2} \left[ k_1 - \left( \frac{k_2 R_{01}}{R_{02}} + \frac{R_{02}}{R_{02}} \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_2 - U'_1} \right]}{(R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_3}{U'_2 - U'_1} \frac{R_{01}}{R_{02} R_{02}} + k_1} \pm \sqrt{\frac{\left[ k_1 - \frac{R_{01}}{k_2} \left[ \left( \frac{k_2 R_{01}}{R_{02}} + \frac{R_{02}}{R_{02}} \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_2 - U'_1} \right] \right]^2}{(R_{01} + R_{02}) \frac{R_{01}}{R_{02} R_{02}} \frac{U'_5 - U'_3}{U'_2 - U'_1} + k_1}} + \frac{R_{01}^2 \frac{U'_5 - U'_3}{U'_2 - U'_1}}{(R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_3}{U'_2 - U'_1} \frac{R_{01}}{R_{02} R_{02}} - k_1}}$
21	$R_{\text{BX}} = \sqrt{\frac{\left[ k_1 + \left( k_1 + k_2 \frac{R_{01}}{R_{02}} \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_1} \right]^2}{k_2 R_{02} + k_2 (R_{01} + R_{02}) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_1}}} - R_{01} \frac{R_{02} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_1}}{\left( \frac{R_{01}}{R_{02}} + k_1 \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_1} + k_1} - \frac{\left( k_1 + k_2 \frac{R_{01}}{R_{02}} \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_1} + k_1}{k_2 (R_{01} + R_{02}) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_1} + k_2 R_{02}}$
22	$R_{\text{BX}} = \sqrt{\frac{R_{02} (k_2 R_{01} + R_{02}) \cdot \left( \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_2} + k_1 \right)}{\frac{R_{02}}{k_2} \left( \frac{R_{01}}{R_{02}} + k_1 \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_2} + k_1}} - R_{01} \frac{(R_{01} + R_{02}) + R_{02} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_2}}{\left( \frac{R_{01}}{R_{02}} + \frac{R_{02}}{R_{02}} \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_2} + k_1} - \frac{(k_2 R_{01} + R_{02}) \cdot \left( \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_2} + k_1 \right)}{\left( \frac{R_{01}}{k_2 R_{02}} + \frac{k_1}{k_2} \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_2} + \frac{k_1}{k_2}}$
23	$R_{\text{BX}} = - \frac{\frac{R_{01} + R_{02}}{k_2} \left( k_1 + \frac{(k_2 R_{01} + R_{02})}{R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_1} \right)}{k_1 - \frac{(R_{01} + R_{02})^2}{R_{02} R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_1}} \pm \sqrt{\frac{\left[ \frac{R_{01} + R_{02}}{k_2} \left( k_1 + \frac{(k_2 R_{01} + R_{02})}{R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_1} \right) \right]^2}{k_1 - \frac{(R_{01} + R_{02})^2}{R_{02} R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_1}} - \frac{R_{01} (R_{01} + R_{02}) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_1}}{k_1 - \frac{(R_{01} + R_{02})^2}{R_{02} R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_1}}}$
24	$R_{\text{BX}} = R_{01} \left( \frac{R_{01}}{R_{02}} \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_4} - \frac{R_{02}}{R_{01}} \right) / \left( k_1 - \frac{R_{01} (R_{01} + R_{02})}{R_{02} R_{02}} \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_3} \right)$
25	$R_{\text{BX}} = R_{01} \frac{U'_3 - U'_5}{U'_5 - U'_1} / \left( \frac{R_{01}}{R_{02}} \frac{U'_5 - U'_3}{U'_5 - U'_1} + k_1 \right)$
26	$R_{\text{BX}} = R_{01} \left( \frac{U'_5 - U'_3}{U'_5 - U'_2} \frac{R_{01}}{R_{02}} - k_1 \right) / \left( k_1 - \frac{U'_5 - U'_3}{U'_5 - U'_2} \frac{R_{01}^2}{R_{02}^2} \right)$
27	$R_{\text{BX}} = (R_{01} + R_{02}) \left( k_1 - \left( \frac{R_{01}}{R_{02}} + \frac{R_{02}}{R_{01} + R_{02}} \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_5 - U'_4} \right) / \left[ \left( \frac{R_{01}^2}{R_{02}^2} + \frac{R_{01}}{R_{02}} + k_1 \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_5 - U'_4} - k_1 \right]$
28	$R_{\text{BX}} = \frac{R_{01}}{k_2} \left( \frac{(R_{01} R_{01} + k_3 R_{01} R_{02} + R_{02} R_{02})}{R_{01} R_{01} + R_{02} R_{01} + R_{02} R_{02}} \frac{U'_5 - U'_4}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right) / \left( \frac{R_{01} (R_{01} + R_{02})}{R_{01} R_{01} + R_{02} R_{01} + R_{02} R_{02}} \frac{U'_4 - U'_5}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right)$
29	$R_{\text{BX}} = \left( k_1 + \frac{(R_{01} + R_{02})^2}{R_{01} R_{01} + R_{02} R_{01} + R_{02} R_{02}} \frac{U'_5 - U'_4}{U'_1 - U'_4} \right) / \left( R_{01} R_{02} \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{01} R_{01} + R_{02} R_{01} + R_{02} R_{02}} \frac{U'_5 - U'_4}{U'_4 - U'_1} \right)$
30	$R_{\text{BX}} = R_{01} \left( k_1 + \frac{k_1}{R_{01} R_{01} + R_{02} R_{01} + R_{02} R_{02}} \frac{U'_5 - U'_4}{U'_4 - U'_2} \right) / \left( \frac{R_{02} (R_{01} + R_{02})}{R_{01} R_{01} + R_{02} R_{01} + R_{02} R_{02}} \frac{U'_5 - U'_4}{U'_2 - U'_4} + k_1 \right)$

1	2
31	$R_{\text{ВХ}} = \sqrt{\left[ \frac{R_{02}}{k_2} \frac{k_1 + \frac{(R_{01}R_{01} + k_3 R_{01}R_{02} + R_{02}R_{02})}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_1}}{k_1 + \frac{(R_{01}R_{01} + k_3 R_{01}R_{02} + R_{02}R_{02})}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_1}} \right]^2 - R_{01}R_{02} \frac{\frac{R_{02}(R_{01} + R_{02})}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_1}}{k_1 + \frac{(R_{01}R_{01} + k_3 R_{01}R_{02} + R_{02}R_{02})}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_1}}}$
32	$R_{\text{ВХ}} = \sqrt{\left[ \frac{\frac{R_{01} + R_{02}}{k_2} - \frac{R_{01} - R_{02}}{k_2} \frac{R_{01}R_{01} + k_3 R_{01}R_{02} + R_{02}R_{02}}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_2}}{k_1 - \frac{R_{01}^2 - R_{02}^2}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_2}} \right]^2 - R_{01}R_{02} - \frac{\frac{R_{01} - R_{02}}{k_2} \frac{R_{01}R_{01} + k_3 R_{01}R_{02} + R_{02}R_{02}}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_2} \frac{R_{01} + R_{02}}{k_2}}{\frac{R_{01}^2 - R_{02}^2}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_2}} - k_1}$
33	$R_{\text{ВХ}} = R_{01} \left( \frac{R_{01}R_{01} + k_3 R_{01}R_{02} + R_{02}R_{02}}{k_2 (R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02})} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_4 - U'_3} + \frac{R_{02}}{R_{01}} \right) \pm \sqrt{\left[ \frac{R_{01}}{k_2} \frac{R_{01}R_{01} + k_3 R_{01}R_{02} + R_{02}R_{02}}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_4 - U'_3} + R_{02} \right]^2 + R_{02} \left( \frac{R_{01}^2}{R_{02}^2 + R_{01}(R_{01} + R_{02})} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_4 - U'_3} + R_{02} \right)}$
34	$R_{\text{ВХ}} = \left( \frac{U'_4 - U'_5}{U'_5 - U'_1} \frac{R_{01}R_{02}(R_{01} + R_{02})}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \right) / \left( k_1 + \frac{R_{01}R_{02}}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_5 - U'_1} \right)$
35	$R_{\text{ВХ}} = R_{01} \left( k_1 - \frac{R_{01}(R_{01} + R_{02})}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_5 - U'_2} \right) / \left( \frac{R_{01}R_{01}}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_5 - U'_2} - k_1 \right)$
36	$R_{\text{ВХ}} = R_{02} \left( k_1 - \frac{R_{02}(R_{01} + R_{02})}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_5 - U'_3} \right) / \left( \frac{R_{02}R_{02}}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_5 - U'_3} - k_1 \right)$

Описанный метод сверхизбыточных измерений обеспечивает получение 55-и действительных значений входного сопротивления ИК, двух действительных значений тока, генерируемого источников тока ИТ, и десяти действительных значений сопротивления резисторов  $R'_{01}$  и  $R'_{02}$ .

Не исключаемая систематическая погрешность сверхизбыточных измерений определяется погрешностями воспроизведения значений образцовых резисторов. Методическая погрешность связана с некорректным выбором значений образцовых резисторов с требуемой погрешностью воспроизведения номинального значения сопротивления и вида функции преобразования измерительного канала (с квазилинейной, а не линейной функцией преобразования).

Ввиду ограничений по объему публикации, следующие такты измерительного преобразования физических величин, в частности, сопротивления исследуемого резистора или резистивного сенсора будут рассмотрены в сообщении 2.

В заключение отметим, что все приведенные 55 вариантов уравнений избыточных измерений входного сопротивления измерительного канала подвергаются структурному анализу.

Структурный анализ уравнений избыточных и сверхизбыточных измерений (УИИ) — новое научное направление в метрологии, направленное на дальнейшее развитие теории избыточных и сверхизбыточных измерений с целью повышения точности, быстродействия и достоверности вычислительной обработки данных.

Приведем пример структурного анализа первого уравнения избыточных измерений входного сопротивления (см. табл.3, №1).

Как видно из табл. 4, структурный анализ включает в себя такие этапы:

1) анализ полученного УИИ по признаку упорядоченности структуры: полностью или частично упорядоченная структура (табл. 4, №1);

2) декомпозицию (упорядочение) структуры УИИ и получение ее в виде, удобном как для выделения физических величин и коэффициентов, объединенных ограниченным числом операций, так и для анализа погрешностей (табл. 4, №2);

3) конституйовані<sup>3</sup> структури, описаніє модифіцированої структури через константи і варіанти методу і другіє коефіцієнти (табл. 4, №3);

4) окончательную форма записи уравнения избыточных измерений, соответствующей методу сравнения с мерой (табл. 4, №4);

5) запись алгоритма (процедуры) параллельной обработки данных по модифицированному уравнению избыточных измерений (табл. 4, №5).

Приведем для читателя определения двух понятий «константа метода» и «варианта метода».

*Константа метода* избыточных и сверхизбыточных измерений — характеристика объединения части нормированных по значениям физических величин, фундаментальных физических констант, постоянных коэффициентов, входящих в структуру уравнения (сверх)избыточных измерений с априори установленными связями (математическими операциями), которая выражается числовым значением и значениями не исключенных составляющих погрешности обработки и погрешности округления ее числового значения.

Табл. 4

**Структурный анализ уравнений избыточных измерений входного сопротивления ИК**

№ п/п	Формы представления уравнений избыточных измерений
1	Не полностью (частично) упорядоченная структура УИИ $R_{\text{вх}} = R_{01} \left( \frac{(U'_5 - U'_2)}{U'_2 - U'_1} \right) / \left( k_1 - \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right)$
2	Структура УИИ после декомпозиции (упорядочения), удобная для выделения объединений и анализа погрешностей $R_{\text{вх}} = R_{01} \left( \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right) / \left( k_1 - \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right)$
3	Структура, полученная в результате конституйования и используемая для обработки данных $R_{\text{вх}} = R_{01} \frac{k_x - k_1}{k_1 - k_0 k_x},$ <p>где <math>k_x = \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1}</math> — варианта метода; <math>k_0 = \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}}</math> — константа метода</p>
4	Окончательная форма записи уравнения избыточных измерений $R_{\text{вх}} = R_{01} \frac{k_{\text{п1}}}{k_{\text{п2}}} = R_{01} k_{\text{п3}} \text{ или } N_{\text{вх}} = N_{01} \frac{k_{\text{п1}}}{k_{\text{п2}}} = N_{01} k_{\text{п3}},$ <p>где производные константы метода <math>k_{\text{п1}} = k_x - k_1</math>, <math>k_{\text{п2}} = k_1 - k_0 k_U</math>, <math>k_{\text{п3}} = k_{\text{п1}} / k_{\text{п2}}</math></p>
5	Алгоритм (процедура) параллельной обработки данных по модифицированному уравнению избыточных измерений $(k_U - k_1) \Rightarrow k_{\text{п1}} \quad \square$ $\quad \quad \quad \cdot k_{\text{п3}} \Rightarrow \times \{R_{01}\} \Rightarrow \{R_{\text{вх}}\}$ $(k_1 - k_{x_0} k_U) \Rightarrow k_{\text{п2}} \quad \square$

*Варианта метода* — характеристика объединения преобразованных входных величин и коэффициентов, которая выражается числовым значением варианты, значениями систематических и случайных составляющих погрешности измерительного преобразования рядов физических величин (без или со статистической обработкой данных), погрешностью вычисления, а также погрешностью округления полученного числового значения варианты.

Структурный анализ уравнений избыточных измерений, его сущность, термины и определения будут описаны отдельной статьей.

Таким образом, описанный метод сверхизбыточных измерений сопротивления резисторов и резистивных датчиков обеспечивает расширение функциональных возможностей средства измерения и решение поставленной технической задачи. Метод обеспечивает: автоматическое исключение аддитивной и

<sup>3</sup> конституйованіє — составление, установление, определение состава, содержания

мультипликативной составляющих систематической погрешности измерения входного сопротивления измерительного канала, определение действительных значений сопротивлений образцовых резисторов, действительного значения тока, текущего через резисторы, погрешности, обусловленные вычислительной обработкой данных, значения коэффициента усиления в процессе эксплуатации омметра и другие.

### Выводы

Дальнейшее развитие получили философские аспекты сверхизбыточных измерений, даны определения понятиям «константа метода» и «варианта метода», расширено понятие «сверхизбыточные измерения».

Впервые в мире приведен классический пример решения задачи сверхизбыточных измерений входного сопротивления измерительного канала.

Показано, что сверхизбыточность достигается за счет использования: а) комбинаторных схем включения нормированных по значению сопротивлений резисторов к измерительному каналу цифрового омметра; б) измерительного преобразования полученных сопротивлений в напряжения при одном значении стабильного тока. Если использовать измерительное преобразование сопротивлений резисторов при другом значении стабильного тока ( $\{I_{02}\} \neq \{I_{01}\}$ ), то это даст дополнительное комбинаторное увеличение числа результатов измерений более чем в 2 раза. Другими словами, избыточность достигается за счет сочетания разных соединений резисторов и режимов работы измерительного канала.

Впервые в мире описан метод сверхизбыточных измерений, обеспечивающий, при проведении первых четырех пяти тактов измерительного преобразования сопротивлений, получение ансамбля из 19-ти уравнений избыточных измерений, а пяти тактов — из 36-и уравнений избыточных измерений и, получение, соответственно, 55-и значений входного сопротивления измерительного канала. Это расширяет возможности метода по статистической обработке полученных результатов с целью уменьшения случайной составляющей погрешности.

Систематическая погрешность сверхизбыточных измерений определяется погрешностями воспроизведения значений образцовых резисторов, нормированного по значению тока и кратковременной стабильностью параметров функции преобразования измерительного канала. Методическая погрешность обусловлена некорректным выбором значений образцовых резисторов с требуемой погрешностью воспроизведения номинального значения сопротивления и установлением вида функции преобразования измерительного канала (с квазилинейной, а не линейной функцией преобразования).

Описанный метод позволяет определять действительные значения сопротивлений образцовых резисторов, действительное значение тока, текущего через резисторы, значения погрешностей, обусловленных вычислительной обработкой данных, а также значения коэффициента усиления в процессе эксплуатации цифрового омметра.

Сверхизбыточные измерения обеспечивают правильность измерений за счет автоматического исключения систематической составляющей погрешности: аддитивной составляющей, — путем использование операций вычитания результатов измерительного преобразования двух физических величин, и мультипликативной составляющей. — за счет деления одного из полученных значений разностей этих пар величин на другое.

Дополнительное использование второго резистора с нормированным по значению сопротивлением обеспечило получение сверхизбыточности по количеству уравнений избыточных измерений и, соответственно, по количеству результатов измерений входного сопротивления измерительного канала. Стало возможным проведение статистической обработки полученных данных и, следовательно, повышение прецизионности измерений, т.е. обеспечить близость друг к другу независимых результатов избыточных измерений, полученных в конкретных регламентированных условиях эксплуатации цифрового омметра.

Сделан еще один шаг в развитии теории и методов сверхизбыточных измерений.

### Литература

1. Кондратов В.Т. Стратегическая теория XXI века /В.Т.Кондратов//Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2001. – № 2. – С. 11 – 16.
2. Кондратов В.Т. Методы избыточных измерений физических величин /В.Т.Кондратов // Засоби комп'ютерної техніки з віртуальними функціями і нові інформаційні технології. Зб. наук. праць / НАН України. Ін-т кібернетики ім. В. М. Глушкова, Наук. рада НАН України з проб. „Кібернетика, Редкол.: Романов В.О. (відп. ред.) та ін. – Київ, 2002.– Т.1. С. 38 – 44.
3. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений /В.Т.Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – № 1. – С. 7 – 24.
4. Кондратов В.Т. Методы избыточных измерений: определения и классификация /В.Т.Кондратов // Научные труды IX Международной научно-практической конференции “Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики”. Отв. ред. В.Д. Ивченко. – М.: МГУПИ, 2006. Дополнительный сборник “Приборостроение”. – С. 42 – 57.
5. Кондратов В.Т. Математические модели избыточных измерений I-го, II-го и III-го родов /В.Т.Кондратов // Научные труды X-й Юбилейной Междунар. науч.-техн. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики». Книга «Приборостроение». — М.: МГУПИ, 2007. — С. 134 –143.
6. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений: уравнения избыточных измерений II-го и III-го родов. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Матеріали XIV міжнародної науково-технічної конференції. 5-10 червня 2015 р., м. Одеса, 2015. – С. 20 – 22.

7. Кондратов В.Т. Классификация математических моделей избыточных измерений физических величин / В.Т.Кондратов // Научные труды X-й Юбилейной Международной научно-технической конференции „Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики”. Книга „Приборостроение”. – М.: МГУ ПИ, 2007. – С. 127 – 134.
8. Кондратов В.Т. Теория и методы избыточных измерений / В.Т.Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012.– № 3 – С. 14 – 22
9. Кондратов В.Т. Меганаука метрология / В.Т.Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2014. — № 4. — С. 69 – 84.
10. Kondratov V.T, Theory of redundant measurements — strategic theory of XXI century. Vymiryuvakna ta obchislyuvalna tekhnika v tekhnologichnykh protsesakh (VOTTP-14-2015). Materialy XIV mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 5-10 iyunja, 2015 g, Odessa, 2015. – PP. 17 – 19/
11. Кондратов В.Т. Спосіб понаднадлишкових (супернадлишкових) вимірювань опору резисторів і резистивних сенсорів. Патент України на винахід № 108581 С2. Бюл. № 9, 12.05.2015.
12. Кондратов В.Т. Сверхизбыточные измерения. Режим доступа: <http://kondratov.com.ua/index.php/nauchnye-trudy-111/glavnye-trudy-2013>.
13. Кондратов В.Т. Научный прорыв в фундаментальной метрологии. Режим доступа: <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamental-metrology-11/scientific-break-in-fundamental-metrology>.

#### References

1. Kondratov V.T. Strategicheskaja teorija XXI veka /V.T.Kondratov//Vymiryuvalna ta obchislyuvalna tekhnika v technologicheskikh protsesakh. — 2001. — № 2. — S. 11 – 16.
2. Kondratov V.T. Metody izbytochnykh izmerenij fizicheskikh velichin /V.T.Kondratov // Zasoby kompyuternoj tekhniki z virtualnymi funktsijami i novi informatsijni tekhnologii. Zb. nauk. prats / NAN Ukrainy. In-t kibernetiky im. V.M. Glushkova, Nauk. rada NAN Ukrainy z prob. „Kibernetika, Pedkol.: Romanov V.O. (vidp. red.) ta in. — Kyiv, 2002. — T.1. S. 38 – 44.
3. Kondratov V.T. Teorija izbytochnykh izmerenij/V.T.Kondratov // Vymiryuvalna ta obchislyuvalna tekhnika v technologicheskikh protsesakh. — 2005. — № 1. — S. 7 – 24.
4. Kondratov V.T. Metody izbytochnykh izmerenij: opredelenija i klasifikatsija /V.T.Kondratov // Nauchnye trudy IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii “Fundamentalnye i prikladnye problemy priborostroenija, informatiki i ekonomiki”. Otv. red. V.D.Ivchenko. — М.: MGUPI, 2006. Dopolnitelnyj sbornik “Priborostroenije”. — S. 42 – 57.
5. Kondratov V.T. Matematicheskiye modeli izbytochnykh izmerenij I-go, II-go i III-go rodov /V.T.Kondratov // Nauchnije trudy X Yubilejnoj Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. «Fundamentalnye i prikladnye problemy priborostroenija, informatiki i ekonomiki”. Kniga «Priborostroenije». — М.: МГУ ПИ, 2007. — S. 134 –143.
6. Kondratov V.T. Teorija izbytochnykh izmerenij: uravnenija izbytochnykh izmerenij II-go i III-go rodov. Vymiryuvalna ta obchislyuvalna tekhnika v technologicheskikh protsesakh. Materialy XIV mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 5-10 chervnja 2015 r., m. Odesa, 2015. — S. 20 – 22.
7. Kondratov V.T. Классификация математических моделей избыточных измерений физических величин /V.T.Kondratov // Nauchnije trudy X Yubilejnoj Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. «Fundamentalnye i prikladnye problemy priborostroenija, informatiki i ekonomiki”. Kniga «Priborostroenije». — М.: МГУ ПИ, 2007. — S. 127 – 134.
8. Kondratov V.T. Teorija i metody izbytochnykh izmerenij / V.T.Kondratov // Vymiryuvalna ta obchislyuvalna tekhnika v technologicheskikh protsesakh. — 2012. — № 3. — S. 14 – 22
9. Kondratov V.T. Меганаука метрология / V.T.Kondratov // Visnyk Khmel'nitskogo natsionalnogo universitetu. Tekhnichni nauky. — 2014. — № 4. — S. 69 – 84.
10. Kondratov V.T, Theory of redundant measurements — strategic theory of XXI century. Vymiryuvakna ta obchislyuvalna tekhnika v tekhnologichnykh protsesakh (VOTTP-14-2015). Materialy XIV mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 5-10 iyunja, 2015 g, Odessa, 2015. — PP. 17 – 19.
11. Kondratov V.T. Sposib ponadnadlyshkovykh (supernadlyshkovykh) vymiryuvan oporu rezistoriv i rezystyvnykh sensoriv. Patent Ukrainy na vynakhid № 108581 S2. Byul. № 9, 12.05.2015.
12. Kondratov V.T. Sverkhizbytochnyje izmerenija. Rezhim dostupa: <http://kondratov.com.ua/index.php/nauchnye-trudy-111/glavnye-trudy-2013>.
13. Kondratov V.T. Nauchnyj proryv v fundamentalnoj mertologii. Rezhim dostupa: <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamental-metrology-11/scientific-break-in-fundamental-metrology>.

Рецензія/Peer review : 24.11.2015 р.

Надрукована/Printed :12.12.2015 р.

## GRAVITATIONAL-ELECTROMAGNETIC RESONANCE OF THE SUN AS ONE OF THE POSSIBLE SOURCES OF AURORAL RADIO EMISSION OF PLANETS IN KILOMETRIC RANGE

**Annotation.** Gravitational-electromagnetic resonance of the Sun (GERS) at a frequency of 202.97 KHz may be a secondary source of auroral radio emission in kilometric range (the auroral kilometric radiation — AKR) of planets having magnetosphere, such as Earth, Saturn, Jupiter, Uranus and Neptune. One of the envelopes of solar wind spectrum can be modulated with electromagnetic signal with a frequency of gravitational-electromagnetic resonance of the Sun. This component of the solar wind at a frequency of 202.97 KHz can also be a driver and a source of modulation of radio emission of the planets in kilometric range. In the spectrum of radio emission of the planets, except the Solar, it may present the components caused by their own gravitational-electromagnetic resonance, and gravitational-electromagnetic resonance of their satellites.

**Keywords:** universal Planck proportions, auroral radio emission, gravitational-electromagnetic resonance.

В.Ф. ТИМКОВ

Аппарат Совета национальной безопасности и обороны Украины

С.В. ТИМКОВ, В.А. ЖУКОВ

Научно-производственное предприятие «ТЖК»

## ГРАВИТАЦИОННО-ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС СОЛНЦА КАК ОДИН ИЗ ВОЗМОЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ АВРОРАЛЬНОЙ РАДИОЭМИССИИ ПЛАНЕТ В КИЛОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Гравитационно-электромагнитный резонанс Солнца (GERS) на частоте 202.97 кГц может быть одним из вторичных источников аврорального радиоизлучения в километровом диапазоне планет, обладающих магнитосферой, например, Земли, Сатурна, Юпитера, Урана и Нептуна. Одна из огибающих спектра солнечного ветра может быть промодулирована электромагнитным сигналом с частотой гравитационно-электромагнитного резонанса Солнца. Эта компонента солнечного ветра на частоте 202.97 кГц также может быть как драйвером, так и источником модуляции радиоизлучения планет в километровом диапазоне. В спектре радиоизлучения планет, кроме Солнечной, возможно присутствуют компоненты, обусловленные как их собственным гравитационно-электромагнитным резонансом, так и гравитационно-электромагнитным резонансом их спутников.

**Ключевые слова:** универсальные пропорции Планка, авроральная радиоэмиссия, гравитационно-электромагнитный резонанс.

### 1. Introduction

In [1,2,3,4,5,6,7,8,9] it is shown, that the AKR is closely connected with the emergence of magnetospheric storms (during magnetospheric sub storms), and its main source and drivers are the following phenomena: gyromagnetic resonance of electrons with an energy of 1 keV (and more) around the magnetic field lines of a planet in the cyclotron the frequency and on the heights, for example the Earth, from 1/3 of its radius; plasma of planet's magnetosphere and the solar wind plasma. AKR Main characteristics: general energy, for example, for the Earth, can be from  $10^6$  to  $10^7$  watts [3]; frequency ranges of the spectrum: for Earth 30 KHz - 800 KHz, for Jupiter from 10 KHz to 1500 KHz, and further in Decameter to 40 MHz, for Saturn from several KHz to 1.2 MHz - 1.3 MHz, for Uranium from tens of KHz to 850 KHz, for Neptune from 20 KHz (and possibly lower) to 600 KHz (and possibly more); polarization in all cases is mostly circular; in all cases there is modulation of frequency of AKR spectrum with the planet rotation and the solar wind [7].

### 2. Gravitational-electromagnetic resonance of the Sun as one of the possible sources of AKR

In [10,11] it is proposed and experimentally proved the law of "Universal Planck proportions." According to this law, in the observable universe, any body with mass  $m$ , creates a gravitational field, which bends the surrounding space with a radius of curvature  $S$  (in fact,  $S$  - is the length of a gravitational wave) and introduces time delay in signal propagation  $t_{dm}$  into this space. Characteristics of the body  $m$ ,  $S$  and  $t_{dm}$  are interconnected with universal Planck proportions [10,11]:

$$m = \frac{m_p}{l_p} S; m = \frac{m_p}{t_p} t_{dm}; S = \frac{l_p}{t_p} t_{dm}; S = \frac{l_p}{m_p} m; t_{dm} = \frac{t_p}{l_p} S; t_{dm} = \frac{t_p}{m_p} m, \quad (1)$$

where:  $l_p, m_p, t_p$  - is Planck's constant, correspondingly - length, mass and the Planck time.

Each of the characteristics of the body  $m$ ,  $S$  and  $t_{dm}$  uniquely determines energetic parameters separately from other's [10,11]:

$$E = mc^2 = F_p S = h_e t_{dm}, \quad (2)$$

where:  $h_e = \frac{E_p}{t_p}$  - is the quantum of Planck energy, where  $E_p$  - Planck energy:  $E_p = m_p c^2$ ;  $F_p$  - is the Planck

power:  $F_p = m_p a_p$ , where  $a_p$  - is Planck accelerating:  $a_p = \frac{l_p}{t_p^2}$ , and for two bodies with weight  $m_1$  and  $m_2$ ,

length of a gravitational wave  $S_1$  and  $S_2$ , the time delay  $t_{dm1}$  and  $t_{dm2}$ , at a distance  $R$  from each other, the law of gravity is given by [10,11]:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2} = F_p \frac{S_1 S_2}{R^2} = F_p c^2 \frac{t_{dm1} t_{dm2}}{R^2}. \quad (3)$$

Based on the data about the mass of astronomical objects [12] and universal Plank proportions (1) there were calculated length value of a gravitational wave and frequency for thus: Earth, Moon, Venus, Mars, Jupiter, Saturn, Sun, Uranus and Neptune:

Name	Weight, kg	Length of a gravitational wave, m	Frequency, GHz
Earth	$5.9722 \times 10^{24}$	0.00443474	67.6
Moon	$7.3477 \times 10^{22}$	0.000054547302	5495.94
Venus	$4.8673 \times 10^{24}$	0.0036143131	82.95
Mars	$6.4169 \times 10^{23}$	0.00047451718	631.78
Jupiter	$1.8981 \times 10^{27}$	1.40948454472	0.2127
Saturn	$5.6832 \times 10^{26}$	0.42201429314	0.7104
Sun	$1.989 \times 10^{30}$	1477.036	$2,0297 \times 10^{-4}$
Uranus	$8.68 \times 10^{25}$	0.0645	4.65
Neptune	$1.02 \times 10^{26}$	0.0757	3.958

It is experimentally confirmed the existence of gravitational-electromagnetic resonance of the Earth (GERE) at a frequency of 67.6 GHz [10,11]. For example, Fig. 1 of [10,11] shows one of the experimental charts, which confirms the existence of gravitational-electromagnetic resonance of the Earth at frequency 67.6 GHz.

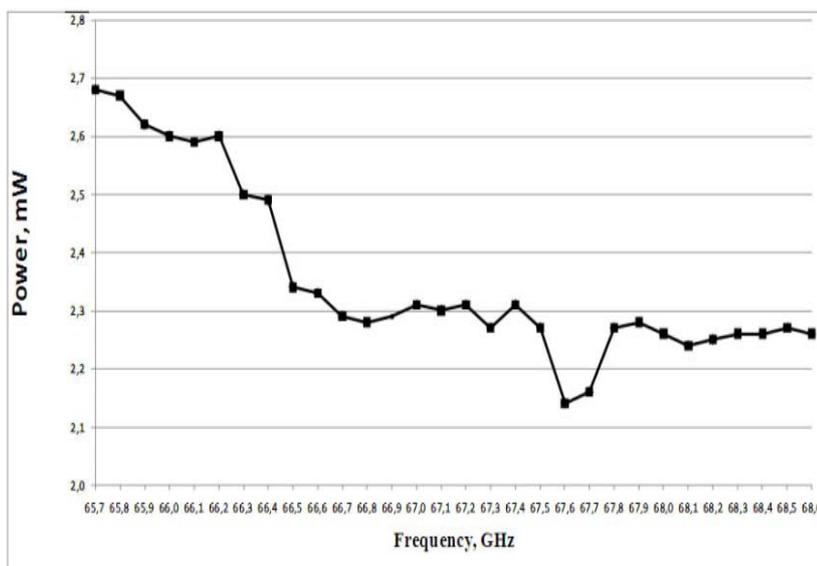


Fig. 1. Graph GERE. The dependence of signal power on frequency in the frequency range from 65.7 GHz to 68.6 GHz with 0.1 GHz at the output of the measuring channel. The signal power at the output of the generator is 4,5 mW [10,11]

The injection of electrons during the magnetospheric storm with an energy of about 1 keV and higher from the plasma region of the magnetosphere of the planet in its auroral region followed by a reflection of some of them because of mirror effect of convergent geomagnetic field leads to resonance and amplification of electromagnetic waves at the cyclotron frequency [4]. Due to the spread of energies of the electrons and the convergence of the magnetic field, it is formed many natural resonance chambers (the effect of the set of natural masers at the cyclotron frequency of electrons), which in its turn leads to multiple resonance in the frequency range from a few KHz to 1.5 MHz. Some of these resonant frequencies and their harmonics are close to the frequency of gravitational-electromagnetic resonance of the Sun 202.97 KHz. Under the influence of the gravitational field of the Sun and envelope of the spectrum of the solar wind, which is modulated by the gravitational-electromagnetic resonance of the Sun, there is a new resonance at frequencies close to the frequency of 202.97 KHz. A distinctive feature of this resonance is that the gravitational-electromagnetic resonance of the Sun is always present, and so it is a relatively

stable and slightly damped. While resonance at other frequencies, usually has no permanent recharge of energy and therefore is periodic and damped.

For example, in [13] it is presented the results of experiments conducted on board of the Cassini spacecraft studying the effect of radio waves, the waves in the plasma and of the solar wind at AKR Saturn (AKR for Saturn - is SKR). These experiments are the Radio and Plasma Wave Science experiment (RPWS) [14], the Dual Technique Magnetometer (MAG) [15] and the Cassini Plasma Spectrometer (CAPS) [16]. At Fig. 2a (spectrum was obtained in the experiment Cassini - RPWS in the time interval 08/19/2004 - 08/21/2004, that is, day of year DOY 232.5-234.0) and Fig. 3a (look at the application) (DOY 224.0-240.0) [13] present the dynamic spectra, which was obtained during the experiment Cassini - RPWS. In the figures it is clearly seen almost continuous line of high values of the power spectral density of electromagnetic signals at frequencies close to the frequency of 202.97 KHz. At the same time, at other frequencies the spectral power density of the electromagnetic signal is of an intermittent nature. At Fig. 2b in the experiment Cassini - RPWS presents research of the Stokes parameter (Stokes parameter  $S$  = total intensity), and Fig. 2c and Fig. 2d present studies of the degree of polarization of the signal, respectively, the circular 2c and line 2d. All three figures show the line corresponding to the presence of gravitational-electromagnetic resonance of the Sun.

Gravitational-electromagnetic resonance of the Sun has varying degrees of influence on the AKR planets. For comparison, the overall picture of AKR 5 planets is shown in Fig. 4 [7], which shows graphs of dependence of the spectrum of electromagnetic signals AKR to the frequency.

AKR of Uranus and Neptune, as seen from their graphs in Fig. 4 are similar to each other. Despite the fact that the frequency of GERS is in the local maxima of the graphs, the impact of GERS on AKR of Uranus and Neptune is minimal. This is due to the considerable distance of the planets from the Sun and therefore a significant reduction in its gravitational potential and a decrease in the density of the solar wind at the location of Uranus and Neptune.

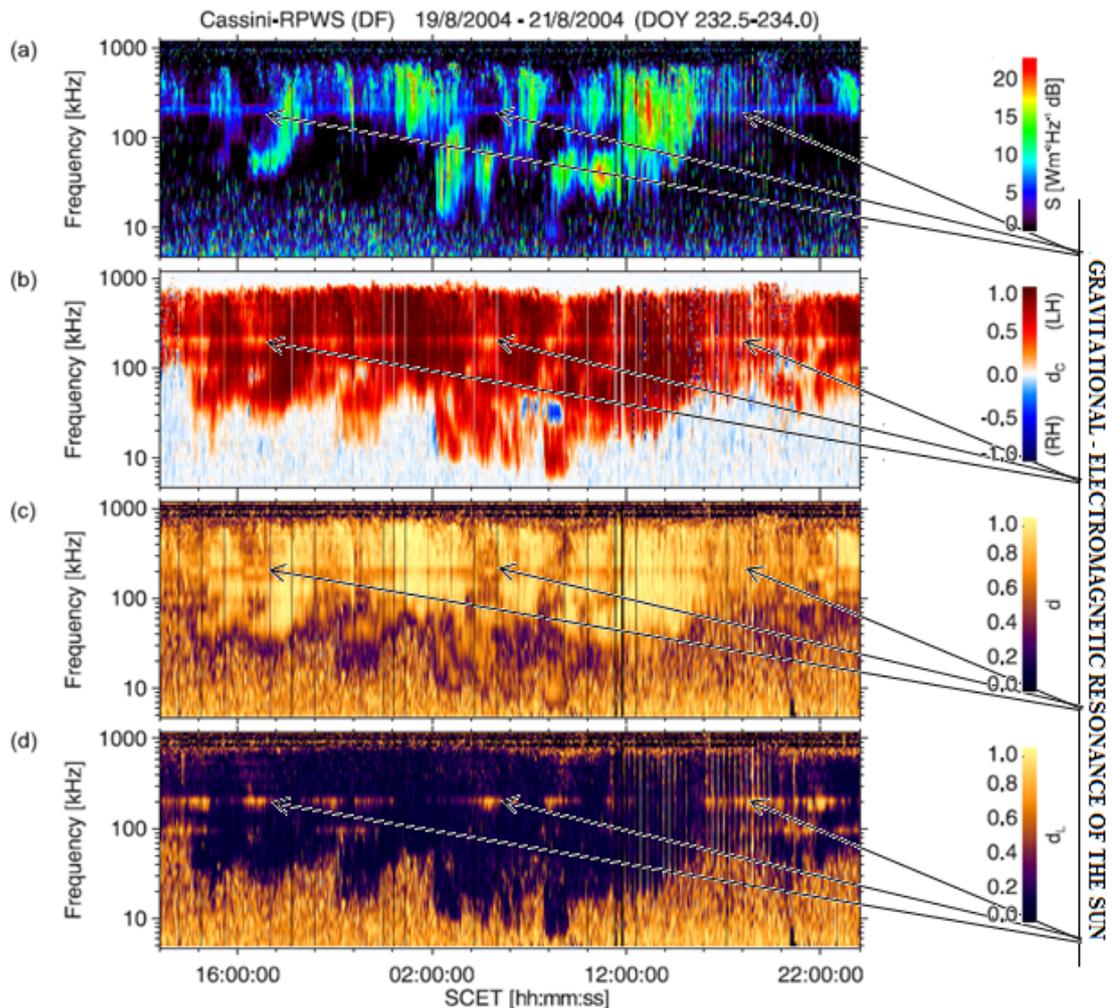


Fig.2. Cassini-RPWS dynamic spectra for (a) the Stokes parameter  $S$  (= total intensity), (b) the degree of circular polarization  $d_c$ , (c) the degree of polarization  $d$  and (d) the degree of linear polarization  $d_l$ , as a result of the Direction-Finding computations for the time period DOY 232.5-234.0, 2004 [13]

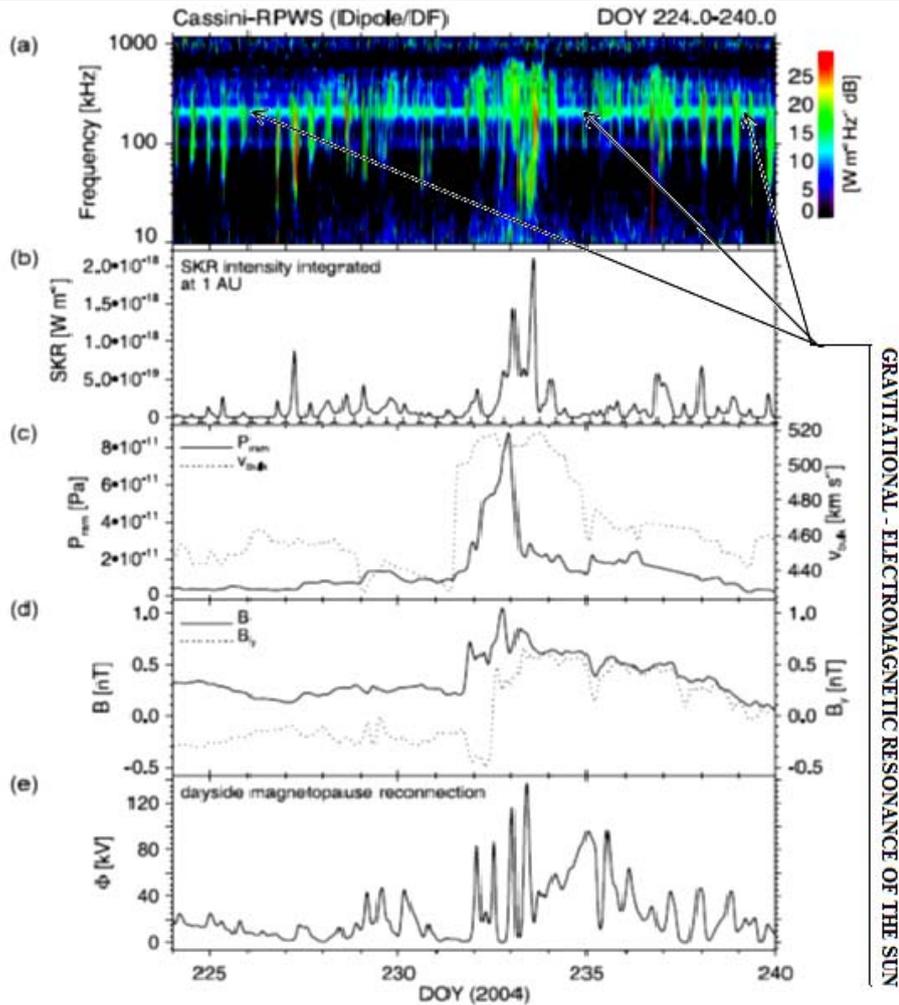


Fig. 3. (a) The RPWS dynamic spectrum, (b) the integrated SKR intensity profile, (c) profiles for the SW ram pressure (solid) and bulk velocity (dotted), (d) profiles for the interplanetary magnetic field strength (solid) and its y-component (dotted) in KSM-coordinates and (e) the profile of the reconnection voltage at the dayside magnetopause of Saturn during DOY 224–240, 2004 [13]

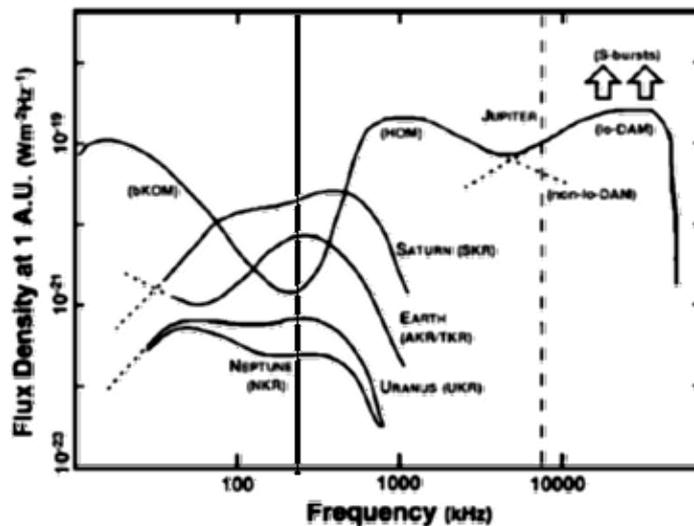


Fig. 4. Comparative spectra of auroral radio emissions of 5 planets [7]

Influence of GERS on the magnetosphere of Jupiter and consequently on his AKR is lower than for example in the AKR of Earth and Saturn (see. Fig. 4). This is due to the fact that the gravitational potential of Jupiter in AKR is much higher than gravitational potential of the Sun and planet's magnetic field is so strong that the effect of modulation of electromagnetic signals using AKR solar wind does not have a dominant influence on the characteristics of AKR, compared with other physical processes.

cThe frequency of gravitational-electromagnetic resonance of Jupiter (GERJ) 212.7 MHz is in the area, which is called synchrotron radio waves (synchrotron radiation), or abbreviated JSR.

In the frequency range from about 100 MHz to about 4 GHz, Jovian synchrotron radiation (hereafter referred as JSR) is emitted from the relativistic electrons, which is a non-thermal and incoherent radiation. JSR has a flat spectrum which is mainly in the decimeter (DIM) range.

Fig. 5 [17] shows a frequency spectrum of the power of radio emission of Jupiter (in comparison with the spectrum of the Earth's AKR), where in the radio DIM (JSR) it is marked the frequency 212.7 MHz. As can be seen from the graph, the power spectrum of the radio emission at a frequency of 212.7 MHz is in the area of global maximum of JSR.

A more detailed structure of JSR spectrum shown in Fig. 6 [18].

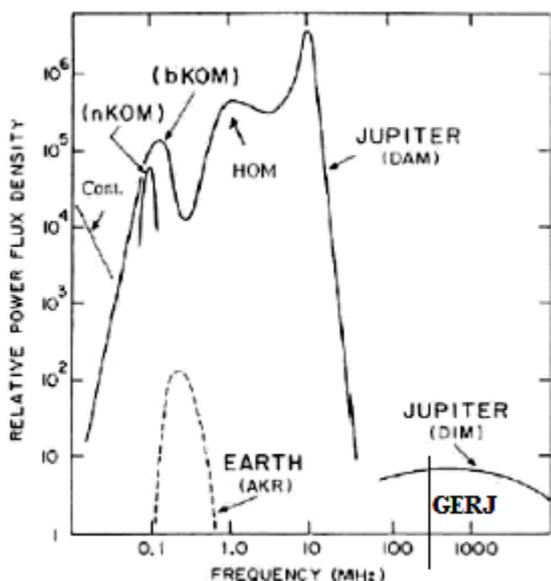


Fig. 5. Spectra of Jovian magnetospheric radiations. The power flux is normalized to constant distance. The spectrum of the Earth's is also shown as a comparison with Jupiter [17]

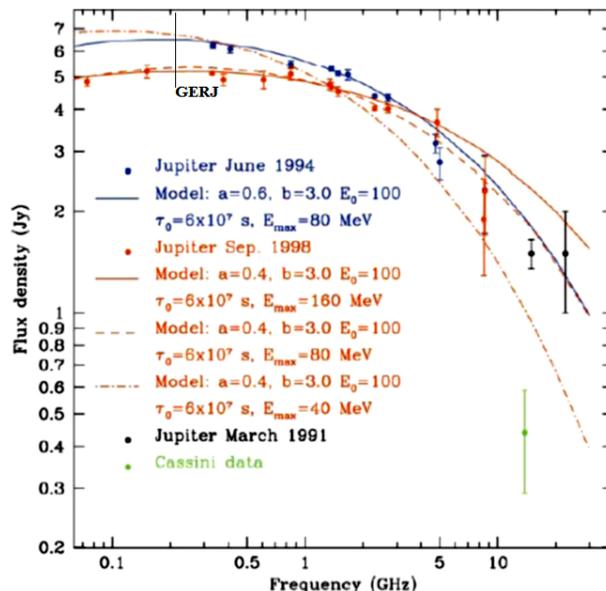


Fig. 6. JSR spectrum from 74 MHz to 8 GHz measured in July 1994 (blue circles) and September 1998 (red circles). The red and blue solid lines are the results of a model simulation [18]

Fig. 6 as well as Fig. 5 confirms that the frequency GERJ is within range of global maximum of spectrum diagram JSR. Based on this, it can be assumed that GERJ may be one of the secondary sources JSR.

GERJ has the greatest influence on the Earth's AKR (AKR Earth also called terrestrial KR, or TKR) and AKR Saturn – SKR.

Nature, sources and parameters of TKR are studied, for example, in [1,2,7,19,20,21,22]. In [19] it is presented the results of experiments on TKR research, carried on a space probe JIKIKEN (EXOS-B). The authors note that the peak of the power spectrum of signals TKR is in the range from 100 KHz to 300 KHz, and the amplification of electromagnetic waves, associated with the acceleration of charged particles, occurs in magneto- Earth at height of 1.5 to 2.15 of its radius. In the experiment, Energy Spectrum of Particles (ESP) it was studied spectra of electrons and protons with energies from 10 eV to 20 keV. Fig. 7 of [19] shows a typical dynamic spectrogram of electrons in the TKR, obtained under the ESP.

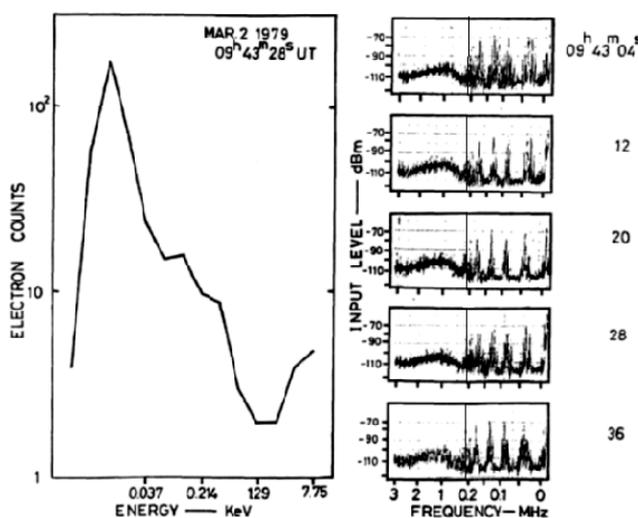


Fig.7. The energetic particle spectrum measured by ESP [19]

Fig. 7 shows that at a frequency of about 200 KHz resonance is observed, which is much less intense than, for example, resonances of about 150KHz - 175 KHz, 120 KHz, 80 KHz, 40 KHz. Fig. 8 of [19] shows the dynamic range of TKR.

On the spectrum of TKR in Fig. 8 it is clearly seen almost continuous line of signal intensity TKR at a frequency of approximately 202.97 KHz. At the same time, at other frequencies the signal intensity TKR is usually intermittent nature. The presence of a solid line at the frequency of 202.97 KHz says about the relative stability of the signal source at that frequency. The nature of the spectra in Fig. 7 and Fig. 8 confirms the earlier suggestion that the cyclotron maser mechanism is the primary source of TKR. Further, the primary resonance frequencies near 202.97 KHz is captured by electromagnetic gravitationally resonance of the Sun and as the gravity of the Sun is always present, there is the effect of gravity - electromagnetic generator on frequency 202.97 KHz with paging signal at the cyclotron frequency (or its harmonics).

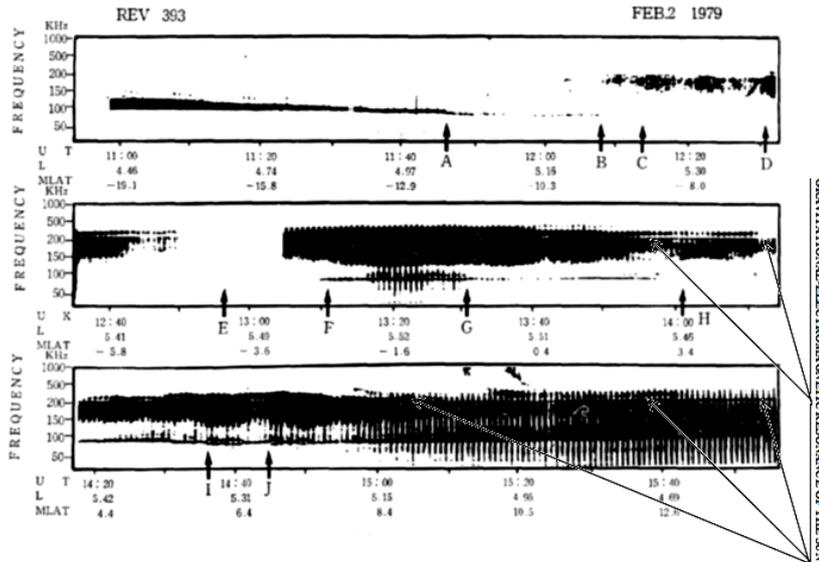


Fig.8. Dynamic spectra of the terrestrial kilometric radiation [19].

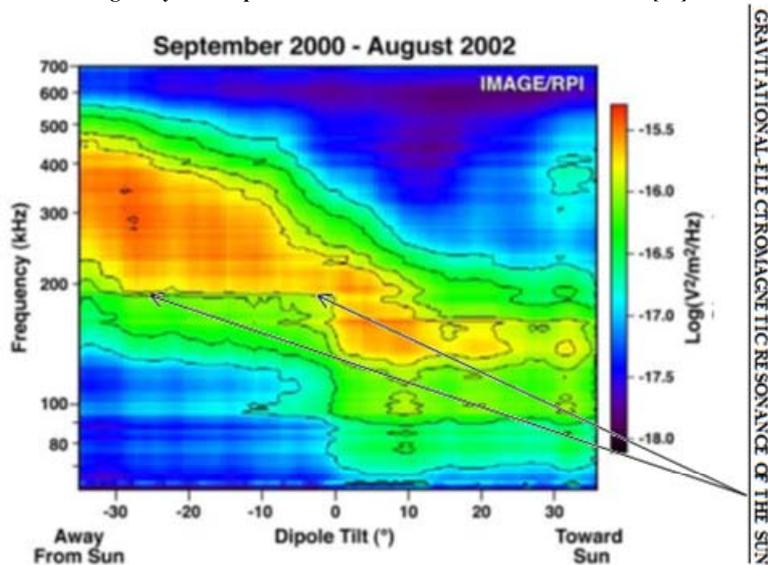


Fig. 9. The average spectra of AKR as a function of dipole tilt angle from observations by the IMAGE/RPI instrument [21]

In [21] it is presented the results of some years of research on board of the Imager for Magnetopause-to-Aurora Glob Exploration (IMAGE) and Polar spacecraft. They were studied the seasonal and solar cycle variations in the spectrum of auroral kilometric radiation (AKR), influence on the spectrum of AKR, dynamics of seasonal and solar cycles. It is also investigated the dependence of the averaged spectra of AKR as a function of dipole tilt angle magnetic field of the Earth. For example, in Fig. 9 [21] is a graph of this dependence.

Distribution of the spectrum signals AKR is following: for negative inclination angles of the dipole from 80 KHz to 500 KHz with a peak power of about 260 KHz, for positive angles of inclination of the dipole from 60 KHz to 250 KHz with a peak power of about 150 KHz. Noteworthy is almost unnaturally straight line on the boundary between the two ranges of the spectrum intensity signals (-16 and -16.5 units) AKR in the area of about 200 KHz for negative

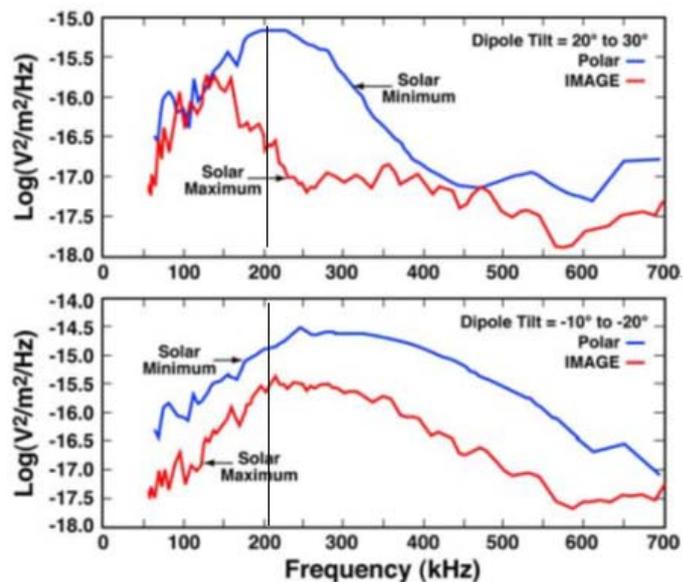


Fig.10. Comparison of the average spectra over the same dipole tilt ranges where the emission peak is approximately constant for both Polar/PWI (blue) and IMAGE/RPI (red) for positive (top) and negative (bottom) dipole tilt angle.[21]

inclination angles the dipole. This straight line means that for maintaining constant power of AKR signal at about -16 units, at frequencies of about 200 KHz, the tilt range of the dipole from 0 degrees to - (27-28) degrees it is used stationary process of paging signal at one and the same frequency - 200 KHz and with the same intensity. It can be assumed that this process - is the gravitational-electromagnetic resonance of the Sun.

For comparing, Fig. 10 [21] shows graphs of averaged spectra of AKR signals for different inclination angles of the dipole of magnetic field of the Earth and the varying intensity of solar activity, obtained from IMAGE and Polar.

As can be seen from Fig. 10 AKR spectrum signals at a frequency of 202.97 KHz are in the area of local maxima, and for the positive slope of the dipole with a minimum of solar activity on the data from Polar - is in the area of global maximum.

In [20] it is presented experimental studies of MF / HF ionospheric radio emission of the Earth's magnetosphere at altitudes between 4 and 7 radiuses of the Earth, obtained by satellite Wind. During the experiment, it was found sporadic intense radiation at frequencies of about 1.8 MHz and more stable, but also less intensive radiation at frequencies of about 4.4 MHz. Fig. 11 [20] shows graphs of power spectrum of AKR signals and the ranges MF / HF, obtained during the mission Wind.

In a part related to the frequency range AKR in the graph in Fig. 11, it can be seen that the frequency 202.97 KHz is in the region of maximum radiation. On the falling part of the chart it can also be seen the zone of its AKR correction towards increasing signal power at frequencies of about 400 KHz, 500 KHz, 600 KHz and 800 KHz. If we exclude the frequency of 500 KHz, we can assume that, as in the formation of secondary sources AKR, except GERS signal at the fundamental frequency 202.97 KHz, and its harmonics 2, 3, 4 are involved. And in formation of high intensity radiation in the frequency range of VHF and HF it is involved respectively: in the frequency range of about 1.8 MHz - 9 th harmonic GERS, and in the frequency region of about 4.4 MHz - 4.6 MHz - 22 and 23 GERS harmonic.

In the graph in Fig. 12 [22] it is shown fine structure of the Earth's AKR signal, obtained during the experiment MEMO on the spacecraft Interball 2.

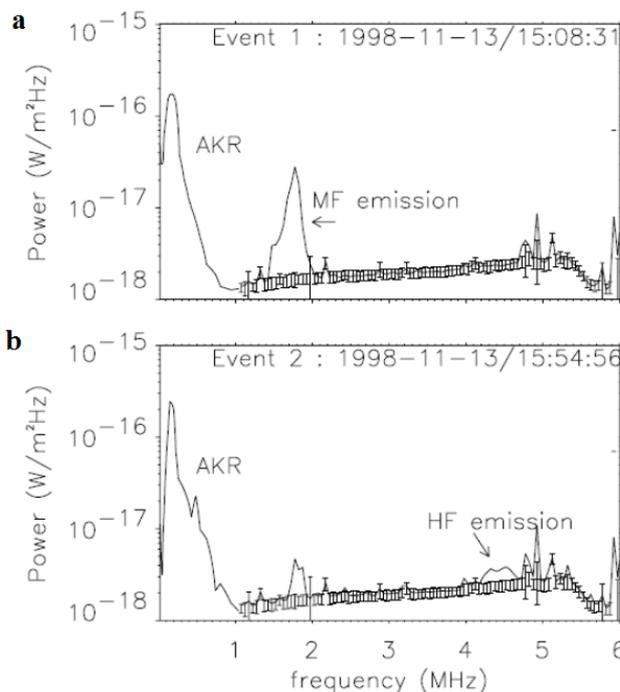


Fig. 11. Power spectra during the MF (top) and HF (bottom) events from the RAD1 (0.02-1.04MHz) and RAD2 (1.075-14MHz) receivers. The MF emission in the top panel peaked at  $f \approx 1.8$  MHz has bandwidth  $\delta f/f \approx 0.14$  HF emission is peaked near  $f_{HF} \approx 4.5$  MHz and has a similar FWHM bandwidth [20]

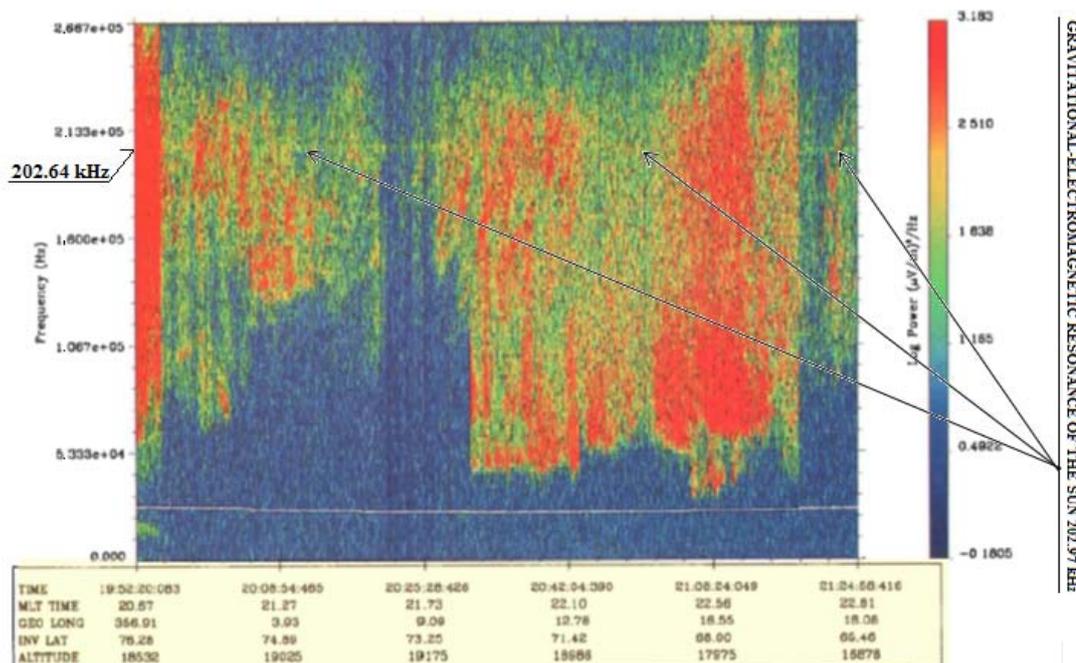


Fig. 12. AKR event recorded by MEMO on January 28, 1997, with an electric sensor. The spectrogram starts at 1952:20 UT and ends at 2124:58 UT.[22]

In Fig. 12 under division of 202.64 KHz it is clearly seen almost solid line of secondary AKR source at a frequency of 202.97 kHz by GERS. Also during the experiment POLRAD mission Interball 2 it was obtained AKR spectra of Earth in the range of 4 KHz - 1 MHz. In Fig. 13 [23] in addition to the fundamental frequency of 202.97 KHz GERS it is shown second and third harmonics at frequencies of about 406 KHz and 609 KHz.

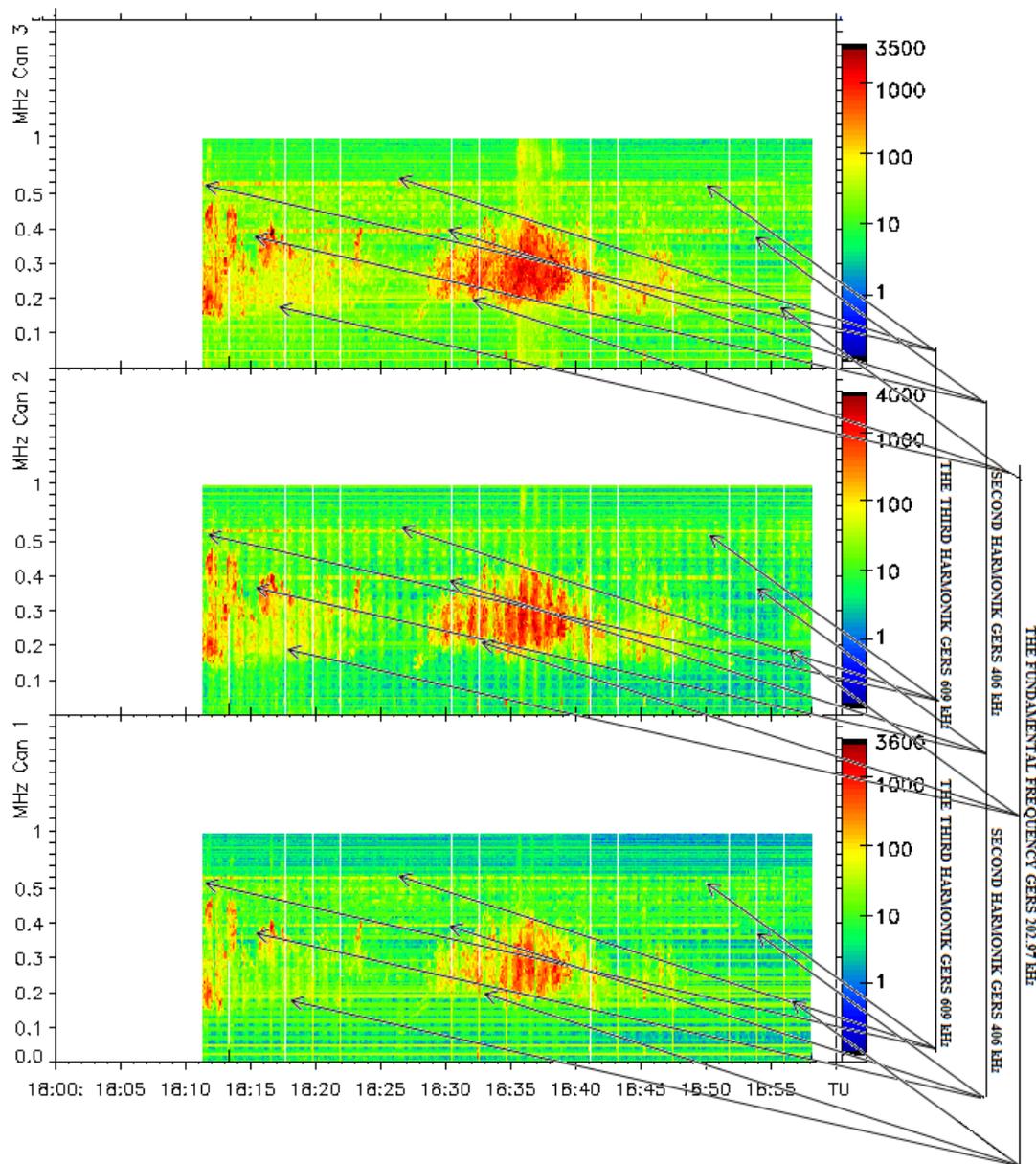


Fig.13. An example of the AKR recorded with Interball 2 by the POLRAD radio-spectro-polarimeter [23]

The presence of higher harmonics GERS in the spectrum AKR says that the GERS is stable and stationary secondary source of AKR.

According to the experimental studies Cassini and Voyager missions, according to [24,25] frequency AKR range of Saturn is in the range from several KHz to 1.2 MHz - 1.3 MHz with a peak of signal at a frequency of about 200 KHz. That also confirms the assumption: GERS can be a secondary AKR source of Saturn at a frequency of 202.97 KHz.

### 3. Conclusion

Gravitational-electromagnetic resonance of the Sun (GERS) at a frequency of 202.97 KHz can be one of the secondary AKR sources of planets, which have magnetosphere, first of all, Earth and Saturn. Gravitational electromagnetic resonance of Jupiter (GERJ) on frequency 212.7 MHz may be one of the secondary sources of JSR.

If you measure the wavelength of enveloping signal of the electromagnetic spectrum from any remote object of the observed Universe, it can determine the mass of the object, based on the law "Universal Plank proportion".

## References

1. Gurnett, D. A.,: The Earth as a radio source: Terrestrial kilometric radiation, *J. Geophys. Res.*,79(28), 4227–4238, doi:10.1029/JA079i028p04227, 1974.
2. Kurth, W. S., M. M. Baumbach, and D. A. Gurnett,: Direction-finding measurements of auroral kilometric radiation, *J. Geophys. Res.*, 80, 2764 - 2770, 1975.
3. Kaiser, M. L., and Alexander, J. K.,: Terrestrial kilometric radiation. III - Average spectral properties, *J. Geophys. Res.*, 82, 3273-3280, 1977.
4. Wu, C. S. and Lee, L. C.,: A theory of terrestrial kilometric radiation, *Astrophys. J.*, 230, 1979.
5. Benson, R.F., Auroral kilometric radiation: Wave modes, harmonics, and source region electron density structures., *J. Geophys. Res.*, 90, 2753- 2784, 1985.
6. Hayes, L. M. and D. B. Melrose,: Generation of ordinary mode auroral kilometric radiation from extraordinary mode waves., *J. Geophys. Res.*, 91, A1, 1986.
7. Zarka, P.,: Auroral radio emission at the outer planets: Observations and theories, *J. Geophys. Res.*,103, 20159, 1998.
8. Louarn, P., and D. Le Quéau,: Generation of the auroral kilometric radiation in plasma cavities – I. Experimental study, *Planet. Space Sci.*, 44(3),1996.
9. Morioka, A. et al.,: Fundamental characteristics of field – aligned auroral acceleration derived from AKR spectra, *J. Geophys. Res.*, 117, doi:10.1029/2011JA017137, 2012.
10. Timkov, V. F., Timkov, S. V., Zhukov, V. A.,: Planck universal proportions. Gravitational - electromagnetic resonance., : "Metrology, technical regulations and quality assurance.", Collection of scientific papers., p.p. 72 – 78, 2015. [http://kachestvo.od.ua/wp-content/uploads/2015/06/Sbornik-MNPK-konferentsii-ODATRYA-2015\\_08\\_09\\_15.pdf](http://kachestvo.od.ua/wp-content/uploads/2015/06/Sbornik-MNPK-konferentsii-ODATRYA-2015_08_09_15.pdf)
11. Timkov, V. F., Timkov, S. V., Zhukov, V. A.,: Planck universal proportions. Gravitational - electromagnetic resonance., *International scientific-technical magazine: Measuring and computing devices in technological processes*, ISSN 2219-9365, 3 (52), p.p. 7 – 11, 2015.
12. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>
13. Taubenschuss, U., H. O. Rucker, W. S. Kurth, B. Cecconi, P. Zarka, M. K. Dougherty, and J. T. Steinberg,: Linear prediction studies for the solar wind and Saturn kilometric radiation, *Ann. Geophys.*, 24, 3139–3150, 2006, [www.ann-geophys.net/24/3139/2006/](http://www.ann-geophys.net/24/3139/2006/)
14. Gurnett, D. A., Kurth, W. S., Kirchner, D. L., Hospodarsky, G. B., Averkamp, T. F., Zarka, P., Lecacheux, A., Manning, R., Roux, A., Canu, P., Cornilleau–Wehrlin, N., Galopeau, P., Meyer, A., Bostrom, R., Gustafsson, G., Wahlund, J.-E., Ahlen, L., Rucker, H. O., Ladreiter, H. P., Macher, W., Woolliscroft, L. J. C., Alleyne, H., Kaiser, M. L., Desch, M. D., Farrell, W. M., Harvey, C. C., Louarn, P., Kellogg, P. J., Goetz, K., and Pedersen, A.: The Cassini radio and plasma wave investigation, *Space Sci. Rev.*, 114, 395–463, 2004.
15. Dougherty, M. K., Kellock, S., Southwood, D. J., Balogh, A., Smith, E. J., Tsurutani, B. T., Gerlach, B., Glassmeier, K.-H., Gleim, F., Russell, C. T., Erdos, G., Neubauer, F. M., and Cowley, S. W. H.: The Cassini magnetic field investigation, *Space Sci. Rev.*, 114, 331–383, 2004.
16. Young, D. T., Berthelier, J. J., Blanc, M., Burch, J. L., Coates, A. J., Goldstein, R., Grande, M., Hill, T. W., Johnson, R. E., Kelha, V., McComas, D. J., Sittler, E. C., Svenes, K. R., Szego, K., Tanskanen, P., Ahola, K., Anderson, D., Bakshi, S., Baragiola, R. A., Barraclough, B. L., Black, R. K., Bolton, S., Booker, T., Bowman, R., Casey, P., Crary, F. J., Delapp, D., Dirks, G., Eaker, N., Funsten, H., Furman, J. D., Gosling, J. T., Hannula, H., Holmlund, C., Huomo, H., Illiano, J. M., Jensen, P., Johnson, M. A., Linder, D. R., Luntama, T., Maurice, S., McCabe, K. P., Mursula, K., Narheim, B. T., Nordholt, J. E., Preece, A., Rudzki, J., Ruitberg, A., Smith, K., Szalai, S., Thomsen, M. F., Viherkanto, K., Vilppola, J., Vollmer, T., Wahl, T. E., West, M., Ylikorpi, T., and Zinsmeyer, C.: Cassini Plasma Spectrometer Investigation, *Space Sci. Rev.*, 114, 1–112, 2004.
17. Takuo Watanabe, Hiroaki Misawai, Fuminori Tsuchiya, Yoshizumi Miyoshi, Toshihiro Abe, and Akira Morioka,: Development of the observation system for the Jovian synchrotron radiation using an aperture synthesis array, *Tohoku Geophys. Journ. (Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5)*, Vol. 37, No. 1, pp.1-89, 2005.
18. Nomura Shiho,: Studies on variation characteristics of the Jovian synchrotron radiation, Tohoku University, 2008. <http://ir.library.tohoku.ac.jp/re/bitstream/10097/34727/1/Nomura-Shiho-02-08-0053.pdf>
19. Oya Hiroshi, : Summary on Plasma Wave Emissions Observed by JIKIKEN - Preliminary Report for the Initial Phase of the Observation Results, *Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5, Geophysics*, Vol. 26, No.1, pp. 1-14, 1979.
20. Bale, S. D., : Observation of topside ionospheric MF/HF radio emission from space, *J. Geophys. Res. Letter*, Vol. 26, NO. 6, p.p. 667-670, 1999.
21. Green James L., Scott Boardsen, Leonard Garcia, Shing F. Fung, and B. W. Reinisch, : Seasonal and solar cycle dynamics of the auroral kilometric radiation source region, *J. Geophys. Res.*, Vol 109, A05223, doi:10.1029/2003JA010311, 2004.
22. Parrot, M., and others,: Propagation characteristics of auroral kilometric radiation observed by the MEMO experiment on Interball 2, *J. GEO R-S P*, 106(A1), p.p. 315-325, 2001.
23. [http://www.iki.rssi.ru/images/auroral/polrad\\_1.gif](http://www.iki.rssi.ru/images/auroral/polrad_1.gif)
24. Cecconi, B., P. Zarka, and W. S. Kurth,: SKR polarization and source localization with

theCassini/RPWS/HFR instrument: First results, <http://www.lesia.obspm.fr/perso/baptiste-cecconi/preprint/cecconiPRE6.pdf>

25. Menietti, J. D., S.-Y. Ye1, C. W. Piker, and B. Cecconi,: The influence of Titan on Saturn kilometricradiation, *Ann. Geophys.*, 28, p.p.395–406, 2010.

#### Література

1. Gurnett, D. A.,: The Earth as a radio source: Terrestrial kilometric radiation, *J. Geophys. Res.*,79(28), 4227–4238, doi:10.1029/JA079i028p04227, 1974.
2. Kurth, W. S., M. M. Baumbach, and D. A. Gurnett,: Direction-finding measurements of auroral kilometric radiation, *J. Geophys. Res.*, 80, 2764 - 2770, 1975.
3. Kaiser, M. L., and Alexander, J. K.,: Terrestrial kilometric radiation. III - Average spectral properties,*J. Geophys. Res.*, 82, 3273-3280, 1977.
4. Wu, C. S. and Lee, L. C.,: A theory of terrestrial kilometric radiation, *Astrophys. J.*, 230, 1979.
5. Benson, R.F., Auroral kilometric radiation: Wave modes, harmonics, and source region electron density structures., *J. Geophys. Res.*, 90, 2753–2784, 1985.
6. Hayes, L. M. and D. B. Melrose,: Generation of ordinary mode auroral kilometric radiation from extraordinary mode waves., *J. Geophys. Res.*, 91, A1, 1986.
7. Zarka, P.,: Auroral radio emission at the outer planets: Observations and theories, *J. Geophys. Res.*,103, 20159, 1998.
8. Louarn, P., and D. Le Quéau,: Generation of the auroral kilometric radiation in plasma cavities – I. Experimental study, *Planet. Space Sci.*, 44(3),1996.
9. Morioka, A. et al.,: Fundamental characteristics of field – aligned auroral acceleration derived from AKR spectra, *J. Geophys. Res.*, 117, doi:10.1029/2011JA017137, 2012.
10. Timkov, V. F., Timkov, S. V., Zhukov, V. A.,: Planck universal proportions. Gravitational -electromagnetic resonance., П'ята Міжнародна науково-практична конференція: "Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості", Збірник наукових праць., стор. 72 – 78, 2015. [http://kachestvo.od.ua/wp-content/uploads/2015/06/Sbornik-MNPK-konferentsii-ODATRYA-2015\\_08\\_09\\_15.pdf](http://kachestvo.od.ua/wp-content/uploads/2015/06/Sbornik-MNPK-konferentsii-ODATRYA-2015_08_09_15.pdf)
11. Timkov, V. F., Timkov, S. V., Zhukov, V. A.,: Planck universal proportions. Gravitational -electromagnetic resonance., Міжнародний науково-технічний журнал: Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, ISSN 2219-9365, 3 (52), стор. 7 – 11, 2015.
12. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>
13. Taubenschuss, U., H. O. Rucker, W. S. Kurth, B. Cecconi, P. Zarka, M. K. Dougherty, and J. T. Steinberg,: Linear prediction studies for the solar wind and Saturn kilometric radiation, *Ann. Geophys.*, 24, 3139–3150, 2006, [www.ann-geophys.net/24/3139/2006/](http://www.ann-geophys.net/24/3139/2006/)
14. Gurnett, D. A., Kurth, W. S., Kirchner, D. L., Hospodarsky, G. B., Averkamp, T. F., Zarka, P., Lecacheux, A., Manning, R., Roux, A., Canu, P., Cornilleau-Wehrlin, N., Galopeau, P., Meyer, A., Bostrom, R., Gustafsson, G., Wahlund, J.-E., Ahlen, L., Rucker, H. O., Ladreiter, H. P., Macher, W., Woolliscroft, L. J. C., Alleyne, H., Kaiser, M. L., Desch, M. D., Farrell, W. M., Harvey, C. C., Louarn, P., Kellogg, P. J., Goetz, K., and Pedersen, A.: The Cassini radio and plasma wave investigation, *Space Sci. Rev.*, 114, 395–463, 2004.
15. Dougherty, M. K., Kellock, S., Southwood, D. J., Balogh, A., Smith, E. J., Tsurutani, B. T., Gerlach, B., Glassmeier, K.-H., Gleim, F., Russell, C. T., Erdos, G., Neubauer, F. M., and Cowley, S. W. H.: The Cassini magnetic field investigation, *Space Sci. Rev.*, 114, 331–383, 2004.
16. Young, D. T., Berthelier, J. J., Blanc, M., Burch, J. L., Coates, A. J., Goldstein, R., Grande, M., Hill, T. W., Johnson, R. E., Kelha, V., McComas, D. J., Sittler, E. C., Svenes, K. R., Szego, K., Tanskanen, P., Ahola, K., Anderson, D., Bakshi, S., Baragiola, R. A., Barraclough, B. L., Black, R. K., Bolton, S., Booker, T., Bowman, R., Casey, P., Crary, F. J., Delapp, D., Dirks, G., Eaker, N., Funsten, H., Furman, J. D., Gosling, J. T., Hannula, H., Holmlund, C., Huomo, H., Illiano, J. M., Jensen, P., Johnson, M. A., Linder, D. R., Luntama, T., Maurice, S., McCabe, K. P., Mursula, K., Narheim, B. T., Nordholt, J. E., Preece, A., Rudzki, J., Ruitberg, A., Smith, K., Szalai, S., Thomsen, M. F., Viherkanto, K., Vilppola, J., Vollmer, T., Wahl, T. E., West, M., Ylikorpi, T., and Zinsmeyer, C.: Cassini Plasma Spectrometer Investigation, *Space Sci. Rev.*, 114, 1–112, 2004.
17. Takuo Watanabe, Hiroaki Misawai, Fuminori Tsuchiya, Yoshizumi Miyoshi, Toshihiro Abe, and Akira Morioka,: Development of the observation system for the Jovian synchrotron radiation using an aperture synthesis array, *Tohoku Geophys. Journ. (Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5)*, Vol. 37, No. 1, pp.1-89, 2005.
18. Nomura Shiho,: Studies on variation characteristics of the Jovian synchrotron radiation, Tohoku University, 2008. <http://ir.library.tohoku.ac.jp/re/bitstream/10097/34727/1/Nomura-Shiho-02-08-0053.pdf>
19. Oya Hiroshi, : Summary on Plasma Wave Emissions Observed by JIKIKEN - Preliminary Report for the Initial Phase of the Observation Results, *Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5, Geophysics*, Vol. 26, No.1, pp. 1-14, 1979.
20. Bale, S. D., : Observation of topside ionospheric MF/HF radio emission from space, *J. Geophys. Res. Letter*, Vol. 26, NO. 6, p.p. 667-670, 1999.
21. Green James L., Scott Boardsen, Leonard Garcia, Shing F. Fung, and B. W. Reinisch, : Seasonal and solar cycle dynamics of the auroral kilometric radiation source region, *J. Geophys. Res.*, Vol 109, A05223, doi:10.1029/2003JA010311, 2004.
22. Parot, M., and others,: Propagation characteristics of auroral kilometric radiation observed by the MEMO experiment on Interball 2, *J. GEO R-S P*, 106(A1), p.p. 315-325, 2001.
23. [http://www.iki.rssi.ru/images/auroral/polrad\\_1.gif](http://www.iki.rssi.ru/images/auroral/polrad_1.gif)
24. Cecconi, B., P. Zarka, and W. S. Kurth,: SKR polarization and source localization with the Cassini/RPWS/HFR instrument: First results, <http://www.lesia.obspm.fr/perso/baptiste-cecconi/preprint/cecconiPRE6.pdf>
25. Menietti, J. D., S.-Y. Ye1, C. W. Piker, and B. Cecconi,: The influence of Titan on Saturn kilometric radiation, *Ann. Geophys.*, 28, p.p.395–406, 2010.

Рецензія/Peer review : 14.11.2015 p.

Надрукована/Printed : 12.12.2015 p.

**МАТЕРИЯ, ПРОСТРАНСТВО, ВРЕМЯ**

*Рассматривается связь существования материи в природе с ее неотъемлемыми атрибутами протяженностями в трехмерном пространстве и времени прохождения явлений. Показано, что материя «самостоятельно», кроме трехмерного пространства существует еще и в одномерном и двумерном пространстве. Существование материи в двумерном пространстве не связано с ее существованием во времени, что позволяет высказать предположение (гипотезу) о движении материальных систем в природе со скоростью существенно превышающей скорость света.*

*Ключевые слова: время, трехмерное пространство, скорость света, скорость продвижения потенциала, антропоцентризм, релятивистская теория*

V.A. VYSHINSKIY

V.M. Glushkov Institute of cybernetics of National academy of Science of Ukraine

**MATTER, SPACE, TIME**

*The connection between the existence of matter in nature with its inherent attributes of extension in three-dimensional space and time passing phenomena. It is shown that the matter of "self" but there is a three-dimensional space and one-dimensional and two-dimensional space. The existence of matter in two dimensions is not related to its existence in time, allowing you to make the assumption (hypothesis) on the movement of material systems in nature with a speed much higher than the speed of light.*

*Keywords: time, three-dimensional space, the speed of light, the speed of advancement potential, anthropocentrism, relativistic theory.*

**1. Введение**

К всевозможным неразгаданным тайнам, которые преследуют человечество с незапамятных времен, необходимо отнести тайны пространства и времени. «Почему, например, тела имеют идентичную протяженность во всех направлениях трехмерного пространства, и что означает эта протяженность? Почему события либо происходят одновременно, либо следуют друг за другом, а, не наоборот, их происхождение имеет начало в будущем и направлено в прошлое?» На разных этапах развития наука пыталась ответить на эти вопросы, и с позиций мистики, и на основе материалистического мировоззрения. Конечно, нас интересуют тот ответ, который это загадочное пространственно-временное существование природы, объяснял бы, как можно адекватнее истине.

В двадцатом веке официальная наука усмотрела, что пространство и время лучшим образом можно познать, взяв на вооружение релятивистскую теорию, которая представлена в известных работах А.Эйнштейна – специальной и общей теории относительности (СТО и ОТО). Прежде чем исходить из позиций этих теорий в исследовании пространственно-временного существования природы, необходимо оценить насколько они приведут к правдоподобному результату. Первое на что необходимо обратить внимание это на то, что в релятивистской теории всегда присутствует наблюдатель, и по отношению к нему исследуются все явления физики. Иными словами, не исключено, что наблюдатель, (субъект) в этом случае, может влиять на результат исследований, тем самым, искажая познаваемую истину.

Присутствие субъекта в познании природы преследует человечество с незапамятных времен. Известен школьный пример, когда в средневековье понимание мироздания основывалось на геоцентризме – весь мир вращается вокруг дома человечества – Земли. Затем, не без потерь (судьба Джордано Бруно), в понимании мира мы продвинулись на позиции гелиоцентризма – в центр Вселенной было помещено Солнце. Такой субъективизм в познании природы, в свое время, был отнесен к антропоцентризму. Двадцатый век тоже не лишен этого идеалистического понимания мира, в нем популярен частный его случай – антропный принцип. Наглядно вред этой идеологии в физике можно продемонстрировать на примере модели расширяющейся Вселенной, так настойчиво предлагаемой современной наукой. Возникает естественный вопрос: «А расширение следует считать с, какого места во Вселенной»? Судя из такой трактовки подмеченного астрономического явления (расширения), искомым местом является то, где мы с вами находимся, т.е. – Земля, а это уже, в чистом виде антропоцентризм, который уже давно человечеством отнесен к ненаучному воззрению. (Кажущееся расширение Вселенной можно объяснить, не прибегая к субъективизму). Так, что, если в наших исследованиях, будем исходить из релятивистских теорий то, имеется большая вероятность получения результатов далеких от истины. Перспектива в познании пространственно-временного существования природы может появиться, если опираться на диалектико-материалистическое мировоззрение, которое предполагает, что время и три пространственные протяженности вещества тесно связаны с ее материальным содержанием. Таким образом, в настоящей работе будем опираться именно на эту связь.

**2. Измерение материи на оси ее объемов**

В исследованиях, приведенных в [1] отмечалось, что согласно закону 5 (постулату) природа

повторяє свої форми існування в просторі. На цю її особливість будемо орієнтуватися при дослідженні розподілу матерії згідно закону 9 (постулату) існування матерії «об'єм в об'ємі». Нагадаємо, що матеріальні системи по величині, займаємих їм об'ємів вистраиваються вздовж послідовності (осі) таким чином, що речовинна форма матерії розташована в діапазоні об'ємів соизмеримих з елементами вакууму до космічних (мега) розмірів. А саме, якщо на рівні найменших складових вакууму речовинні системи мають вигляд фотона, електрона, позитрона, магнітних мас Норд і Зюйд, елементарних джерел гравітаційного поля, то на мега рівні вони вимірюються вже навіть не в метрах, а в часовому інтервалі (парсеках) проходження світлом протяженностей речовинних скоплень. Крім того, найпростіші матеріальні утворення, з'явившись в вакуумі, як наслідок порушення його однорідності, є елементарними частинками речовини, оскільки їх складові об'єми вже не характеризують речовинну, а іншу форму матерії. Іншими словами, в цьому місці відбувається якісний перехід (скачок) до інших проявів матеріальної субстанції. Отже, слід зрозуміти, що межею речовинної форми матерії, з боку дрібніших її розмірів на розглядаємій осі виступає вакуум. Як уже зазначалося в [1], така особливість природи не дозволяє виявити вакуум за допомогою речовинних утворень. Отже людині не вдасться виявити вакуум не тільки за допомогою своїх почуттів, але й за допомогою спеціальних приладів з речовини.

В роботі [2] запропонована модель вакууму  $V_1$ , в якій «народжується» речовина. Ця модель представляє простір, заповнене сукупністю однакових ступенів матеріальної субстанції, кожен з яких сформований природою на основі свого вакууму  $V_2$ , за аналогії з тим, як сформований вакуум  $V_1$ . Згідно дії закону 5 (матерія в природі існує в повторюваних формах), можна передбачити, що вакуум  $V_2$  має ту ж структуру, ті ж особливості, що і вакуум  $V_1$ . В свою чергу, на основі цього ж закону, вакуум  $V_2$  повинен повторювати своїх «предшественників», т.е. містити в собі аналогічний вакуум виду  $V_3$ , і т.п.

Якщо взяти закон 10, про пізнаваність природи, то не складно передбачити, що на нескінченній ланці пізнання, в дрібнішу сторону існування матерії, таких вакуумів буде нескінченна кількість. Кожен з них, згідно закону 9 (об'єм в об'ємі), на такій осі існування матерії (в сторону її дрібнення) знаходиться на повністю конкретній її позначці. По видимому, в сторону збільшення форми існування матерії (її мега форми) цей процес з вакуумами повинен бути аналогічним. З чого випливає, що представляємою нами існування матерії, в якій ми перебуваємо, є не чим іншим, як мега ступінь матеріальної субстанції вакууму з мега розмірами. І таких мега вакуумів в природі повинно існувати нескінченна кількість. Ця особливість, запропонованої моделі існування матерії, дозволяє прийти до висновку, що в сусідньому такому ж, аналогічному нашому світу мега ступеню матеріальної субстанції, існує ще такий же подібний світ, т.е. паралельний світ. І таких світів нескінченна кількість.

Отже, ми розглянули вісь, вздовж якої вистраиваються форми існування матерії по розміру її об'ємів. Узловими позначками на такій осі є місця, в яких відбувається перехід матерії з однієї її форми існування в іншу, і, що загальною в такому вистраиванні, є те, що на кожному її інтервалі (між позначками), кожен об'єм характеризується своїм вакуумом.

Крім того, вистраивання матерії вздовж осі об'ємів, природа наділила її ще й протяженностями вздовж трьох координатних осей, а також часом проходження в ній явлень. Покажемо, що в нашій моделі вакууму  $V_1$  «органічно» вплітаються всі ці чотири виміри.

### 3. Існування матерії в двовимірному просторі

Отже, розглянемо модель  $V_1$ , яка, як зазначалося вище, розташована на осі об'ємів представлення матерії, де відбувається перехід від речовини до вакууму (в напрямку дрібнення матерії). По наших передбаченнях, для формування такого вакууму  $V_1$  в природі «народжується» матерія з її неотъемлемими атрибутами – простором і часом. Крім того, позначені атрибути – їх протяженність в тривимірному просторі матерії і тривалість явлень такі, що забезпечують просторові і часові властивості речовини, до яких звикло людство. Справа в тому, що для появи наступного вакууму  $V_2$  вздовж розглядаємій осі об'ємів потрібні свої масштаби просторових і часових розмірів. Це випливає з закону пізнання, і закону, що характеризує повторюваність форм і структур вмісту матерії.

«Перші кроки» природи на нашому етапі досліджень, спрямовані на виникнення необхідної форми існування матерії для розглядаємого випадку, згідно закону єдності і боротьби протилежностей (постулат в наших дослідженнях), є в зіткненні субстанцій – порожнього простору і матерії (також наш постулат). В результаті такого зіткнення, як це вже зазначалося в [1], матеріальна субстанція, отримує свою протяженність, по одній з сторін якої з'являється у неї властивість притягувати до себе подібну структуру матерії. Позначене взаємодія формує у

матеріальної субстанції протяженність в одномерному просторі, приче́м це одномерне просторі являється, як би, урезанным – его размер от начала координат направлен только в одну сторону – в положительную, либо отрицательную сторону оси аппликата одномерной Декартовой системы координат. В пустом просторі таких матеріальних субстанцій со своими одномерными измерениями, по различным направлениям, имеется бесконечное множество. Те матеріальні субстанції (попарно), которые имеют свои протяженности в противоположных направлениях, притягиваются друг к другу, поскольку в каждой из них притягивание себе подобных находится с противоположных сторон их направленности растягивания матеріальной субстанції. Таким образом, в пустом просторі появляются пары сгустков материи, в которых она уже представлена в двумерном просторі, приче́м полноправном – размеры материи имеются вдоль обеих сторон оси аппликата этого просторі. Вторая ось (ордината) двумерной Декартовой системы координат, указывает на расстояние между парой рассматриваемых сгустков.

Таким способом появившаяся пара сгустков матеріальной субстанції представляет собой диполь, каждый из которых расположен в своей координатной системе. В диполе эти координатные системы не совмещаются, поскольку, в противном случае, любое совмещение привело бы к сокращению протяженностей матеріальных сгустков, что повлекло бы за собой уменьшение, а, в конечном итоге, к уничтожению их сил притяжения. По этому сгустки матеріальной субстанції в диполе расположены на фиксированном расстоянии, и находятся в напряжении друг по отношению к другу, которое, с одной стороны, как уже отмечалось, стремится разорвать данный диполь и, с другой стороны, совместить его составляющие в единой точке просторі. Таким образом, координатные системы двух сгустков в диполе смещены друг по отношению к другу лишь вдоль оси, на которой эти сгустки во взаимодействии с субстанцией пустого просторі приобретают свои протяженности в одномерном просторі, увеличивая их, либо уменьшая в зависимости от ослабления, или увеличения сил притяжения в диполе. Такое несовпадение координатных систем двух сгустков в диполе не позволяет полностью компенсировать их силы притяжения друг к другу. В результате не скомпенсированная часть сил притяжения в сгустках обеспечивает притяжение в диполе с двух противоположных сторон таких же диполей друг к другу. Взаимодействие таких двух диполей приводит к вращению их друг вокруг друга. Это вращательное движение возникает следующим образом. Как уже отмечалось, два диполя притягиваются друг к другу. При этом происходит разбалансирование сил притяжения с процессом удлинения матеріальных субстанцій, которое следует из того, что увеличение силы притяжения с одной стороны в одном сгустке уменьшает притяжение в противоположном ему сгустке. Уменьшению силы притяжения в матеріальной субстанції незамедлительно вызывает увеличение ее размера в его одномерном просторі. Процесс удлинения сказывается на месторасположении в просторі двух рассматриваемых матеріальных субстанцій диполя. Они, удлиняясь, удаляются (движутся) друг относительно друга. В то же время, удлинение матеріальных субстанцій вызывает и рост их сил притяжения, в результате чего притяжение между сгустками увеличивается, но уже не вдоль прежней линии, а несколько повернутой относительно условного центра, рассматриваемой пары диполей. Этот процесс притягивания двух диполей будет сопровождаться поворотом их месторасположения в просторі, что проявляется, как движение по окружности диполей друг относительно друга.

В этом притяжении и вращательном движении диполей примут участие, и другие диполи из окружающего просторі, и процесс такого присоединения диполей остановится тогда, когда силы притяжения новых диполей уже не смогут вызывать их движение вокруг центра, образовавшегося скопления диполей. Это диктуется с одной стороны самой силой притяжения диполя и, с другой стороны, расстоянием до центра, возникшего скопления. Напомним, такие матеріальні образования диполей расположены в двумерном просторі. В исследованиях [2] их обозначено, как диски, взаимодействие которых в пустом просторі приводит к формированию целых пластин двумерного просторі бесконечных размеров. Как уже отмечалось в таких пластинах вращательное движение диполей остановлено за счет влияния дисков друг на друга. Напомним, вращающийся диск представляет собой похожую систему матеріальных скоплений, которые имеют место в космической системе Земля-Луна. В такой системе матеріальні скопления в центре, соответствующие массе Земли, продолжают вращаться, а спутниковая часть остановлена. Остановка вращения диска вызывает упругое состояние пластины в предлагаемой модели вакуума.

#### 4. Материя в третьем измерении трехмерного пространства и во времени

Было замечено [2], что в модели пластин вакуума диски своими спутниковыми частями перемещаются в соседнюю пластину вакуума, формируя тем самым третье измерение в Декартовой трехмерной системе вдоль оси абсцисс. Следует заметить, что центральная часть диска остается в прежней пластине, а ее спутниковая перемещается в соседнюю пластину. Таким образом, ось аппликата повернется в сторону оси абсцисс, первоначальной ориентации сгустка матеріальной субстанції вакуума, на небольшой угол. Более того, в новой ориентации сгустка ось ординат его Декартовой системы тоже повернется вокруг оси абсцисс в сторону движения спутниковой части сгустка. Таким образом, сгусток матеріальной субстанції примет совершенно новое расположение в просторі, ориентируя вокруг себя сгустки вакуума уже в новой пластине. Этот поворот (новая ориентация) приводит к исчезновению старой ориентации, т.е. в данной точке просторі вакуум будет выстроен, своими сгустками материи уже по-

новому. Дальнейшее поведение сгустка в этой точке пространства вызовет новый поворот Декартовой его системы координат, что будет характеризоваться и новой ориентацией вакуумной пластины. Через вполне фиксированное количество поворотов системы координат ориентация вакуума по отношению к нашему сгустку материальной субстанции приведет к исходному его положению. Цикл этого поворота можно идентифицировать с фиксированным промежутком времени, к которому таким способом «привязывается» существование материи в нашем вакууме  $V_1$ , т.е. в одной и той же точке пространства прежняя ориентация сгустка возвращается через определенный промежуток времени. В рассматриваемой точке пространства своей ориентацией декартовой системы координат диск сгустков материальной субстанции вакуума  $V_1$  «пробегает» практически все направления третьей координаты Декартовой системы. И так, происходит аналогичный процесс во всех точках пространства исследуемого нами вакуума  $V_1$ .

### Выводы

Исследования, проведенные в работах [1,2], направлены на построение модели вакуума, в котором «рождается» вещество, представляющее все живое и неживое в окружающем нас мире, а также познание через такую модель его свойств. Напомним, что познание природы всегда носит бесконечный характер, в процессе которого и происходит поиск истины. По мере изложения особенностей предлагаемой модели происходило уточнения структуры вакуума, в которой должна быть показана связь материи (вещества) с протяженностями трехмерного пространства и сути «течения» времени в явлениях ее существования. Из нашей модели пространства и времени стало понятно, что материя в вещественной форме может существовать в одномерном, двухмерном и трехмерном измерении. Примером ее существования в двумерном пространстве являются пластины сгустков материальной субстанции вакуума. Именно в этих пластинах, как показано в [2], происходит искажение его однородности, которую мы идентифицируем с проявлением напряженности любого поля. Это искажение никак не связано с проявлением в вещественной форме материи временного интервала. Ведь оно (время) появляется лишь тогда, когда сгусток материальной субстанции, вызывающий напряженность поля – искажение однородности вакуума в пластине изменяет ориентацию своей координатной системы. Тем самым, он покидает первую пластину с искажением ее однородности, и переходит в соседнюю вторую пластину в вакууме, в которой искажения уже им не вызывается. Таким образом, время распространения искажения в первой пластине никак не связано с координатой времени в вещественной форме материи, и по этому оно распространяется со скоростью существенно большей чем, например, скорость света. Следует заметить, что в рассматриваемом случае проявление временной задержки тоже имеет место, однако оно существенно короче и определяется существованием материи на уровнях вакуумов  $V_2$ ,  $V_3$  и т.д.

Следует обратить внимание также на ту особенность предлагаемой модели, которая указывает на способность вакуума самопроизвольно «успокаиваться» после его искажения (возбуждения). Дело в том, что, как следует из приведенных выше исследований, при переходе сгустка материи от одной пластины к другой, в первой пластине источник искажения вакуума исчезает, а во второй (новой) не появляется. Вот почему электрические заряды, добытые обычным трением, со временем, – исчезают, а в электрогенераторе, после его остановки – напряжение пропадает. Следует также обратить внимание еще и на то, что в нашей модели существование материи неразрывно связано с его протяженностями и явлениями, отражающими трехмерное пространство и время, так характерными для окружающей среды.

Кроме того, использование в исследованиях еще одной меры форм материального существования – оси, на которой эти формы выстраиваются в бесконечные последовательности их объемов, позволяет рассматривать бесконечность природы с позиций построения ее в виде вакуумов – в виде объемов материальных систем. Тогда, продвижение по этой бесконечной оси, в сторону мега объемов материи, позволяет, с материалистических позиций, предположить реальную возможность существования параллельных миров похожих на наш вещественный мир, и возможность «заглянуть» в их содержание.

### Литература

1. Вышинский В.А. Всеобщие законы природы и новая система постулатов физики / В.А. Вышинский // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. – №4. – С.24-32
2. Вышинский В.А. Физическое поле в вакууме / В.А. Вышинский // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – №1 – С. 21-28

### References

1. V.A. Vyshinskiy Vseobshie zakoni prirodi i novaiy sistema postulatov phiziki/ V.A. Vyshinskiy// Vimiruvalna ta oshisluvalna teshnika v teshnologishnish procesash. – 2014. №4 – P. 24-32
2. V.A. Vyshinskiy Phizichskoe pole v vakuume/ V.A. Vyshinskiy// Vimiruvalna ta oshisluvalna teshnika v teshnologishnish procesash. – 2015. №1 – P.21-28

Рецензія/Peer review : 4.11.2015 р.

Надрукована/Printed :19.12.2015 р.

УДК 620.72(075.8)

С. Г. ДЖАБАРОВ

Институт физики НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджан

## КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ТИТАНАТА БАРИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Детально исследована кристаллическая структура титаната бария  $BaTiO_3$  со структурой типа смещения, в которой наблюдается целый ряд физических явлений, изучение которых является одной из наиболее актуальных задач современной физики конденсированных сред – сегнетоэлектричество, пьезоэлектрический эффект, пьезоэлектричество, структурные фазовые переходы. Представлены результаты исследования температурной и барической зависимости кристаллических параметров и особенностей фазовых переходов в  $BaTiO_3$ .

**Ключевые слова:** титанат бария, сегнетоэлектричество, пьезоэлектрический эффект, пьезоэлектричество, структурные фазовые переходы.

SAKIN HAMID OGLY JABAROV

Institute of Physics Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

### CRYSTAL STRUCTURE OF BARIUM TITANATE AT THE INFLUENCE OF PRESSURE AND TEMPERATURE

**Annotation.** Review of aimed at detailed study of the crystal structure of barium titanate  $BaTiO_3$  with the structure of the displacement type, in which there are a number of interesting physical phenomena, the study of which is one of the most urgent problems of modern condensed matter physics – ferroelectricity, pyroelectric effect, piezoelectricity, structural phase transitions. The author presents the results of studies of the temperature and pressure dependence of the crystal parameters and features of phase transitions in  $BaTiO_3$ .

It was experimentally proved that at a high temperature of  $T=406$  K, a structural phase transition was discovered in the  $BaTiO_3$  ferroelectric from the tetragonal crystal structure with the  $P4/m$  space group (ferroelectric phase) to a high-temperature cubic structure with the  $Pmm$  space group. At a low temperature of  $T=263$  K, a structural phase transition was discovered in the  $BaTiO_3$  from the tetragonal crystal structure with the  $P4/m$  space group (ferroelectric phase) to a low-temperature orthorhombic structure with the  $Amm2$  space group (ferroelectric phase), and at a temperature of  $T=180$  K – to the low-temperature rhombohedral structure with the  $R3m$  space group (ferroelectric phase).

At high pressure of  $P=2.16$  GPa and room temperature, a phase transition takes place in  $BaTiO_3$  from the tetragonal crystal structure with the  $P4/m$  space group (ferroelectric phase) to a cubic structure with the  $Pmm$  space group (paraelectric phase). In the  $BaTiO_3$  ferroelectric, the temperature of the phase transition from monocline phase into the orthorhombic phase reduces at a pressure with a coefficient of  $dT_c/dP=-46$  K/GPa. The P-T phase diagram of the composite oxide  $BaTiO_3$  requires study under a wide range of pressures and temperatures.

**Keywords:** barium titanate, ferroelectricity, pyroelectric effect, piezoelectricity, structural phase transitions.

### Введение

Исследование физических свойств оксидных сегнетоэлектрических материалов является одной из наиболее актуальных задач современной физики конденсированного состояния. Это связано с широким кругом уникальных физических явлений, которые наблюдаются в таких соединениях при высоких давлениях и температурах: формирование сегнетоэлектрических и антисегнетоэлектрических состояний, структурные фазовые переходы различного типа, развитие магнетоэлектрического эффекта. Кроме этого, такие материалы находят широкое применение в современной электронике, что обуславливает необходимость тщательного изучения их структуры и физических свойств. Относительная простота кристаллической структуры делает перовскитные сегнетоэлектрики удобными модельными объектами для теоретических расчетов, в том числе для описания сегнетоэлектрического эффекта, построения моделей развития магнетоэлектрического эффекта и других сложных физических явлений. Кроме этого, перспективы создания новых уникальных материалов для различных технологических применений, в которых электрическими и магнитными свойствами можно управлять через варьирование особенностями атомной структуры, сделали исследование кристаллической структуры сегнетоэлектриков-мультиферроиков одной из наиболее актуальных проблем современной физики конденсированного состояния. В настоящее время ведутся широкомасштабные исследования известных материалов и поиск новых материалов.

Физические свойства сегнетоэлектрических материалов напрямую связаны с особенностями их строения на атомарном уровне. Структурные исследования при высоких давлениях, при низких и высоких температурах дают уникальную возможность изучения взаимосвязи изменений структурных параметров кристалла, межатомных расстояний и углов с изменениями магнитной структуры и макроскопических физических свойств, что необходимо для понимания природы и механизмов физических явлений.

В данном обзоре представлены результаты исследования структурных изменений сегнетоэлектрика типа смещение  $BaTiO_3$  при высоких давлениях при высоких и низких температурах методом рентгеновского дифракции.

## 2. Результаты и их обсуждение

### 2.1. Перовскитовая структура

Среди неорганических соединений выделяют группу кристаллов, у которых основными структурными элементами являются октаэдры  $VO_6$ , сочлененные друг с другом разными способами. Среди октаэдрических структур особое место занимают семейство перовскита, в том числе слоистые перовскитоподобные, содержащие двумерные одинарные, двойные и т. д. слои связанные вершинами октаэдров.

Структура перовскита впервые была обнаружена в  $CaTiO_3$  [1]. Идеальный перовскит представляет собой простейшую структуру ионных кристаллов с двумя разными катионами. Перовскит является беспараметрической структурой и положение всех ионов в этих структурах полностью задается величиной параметра примитивной кубической ячейки  $a_0$ . В ячейке имеется одна единица  $ABO_3$  ( $Z=1$ ), а для координат ионов обычно используется один из двух вариантов выбора начала координат в пространственной группе  $Pm\bar{3}m$ . В основном используется случай, в котором в объемном каркасе октаэдры  $VO_6$ , соединены с катионами А в кубооктаэдрических анионных пустотах (рис. 1).

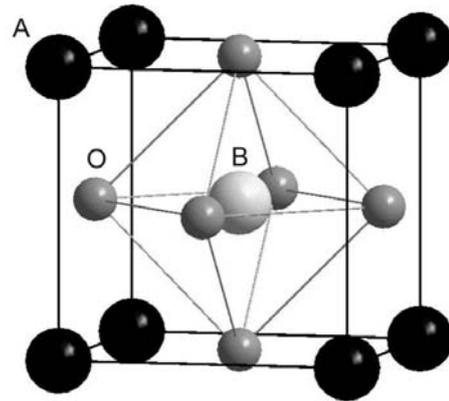


Рис. 1. Идеальная перовскитовая структура  $ABO_3$

Параметр ячейки правильного перовскита  $a$  определяется при помощи межатомных расстояний А–О и В–О. Если рассматривать упаковку как идеальную, в которой ионные радиусы  $R_A$ ,  $R_B$  и  $R_O$  таковы, что все ближайшие катионы и анионы в структуре касаются друг друга, то параметр ячейки правильного перовскита  $a$  можно представить следующим образом:

$$R_A = 2\sqrt{2}R_O = 2(R_O + R_B) = \sqrt{2}(R_A + R_O) \quad (1)$$

Структура перовскита сохраняется также при отличии размеров ионов от идеального соотношения (1). Гольшмидт ввел понятие толеранс-фактора  $t$  для описания степени этого отклонения:

$$t = (R_A + R_O) / \sqrt{2}(R_B + R_O) \quad (2)$$

При идеальном виде упаковки  $R_A = R_O$  в слое  $AO_3$  ионы А и О, О и О касаются друг друга, а катионы В полностью соответствуют размерам октаэдрических анионных пустот ( $R_B = 0.41R_O$ ). В данном случае (но не только в этом)  $t = 1$ . При  $R_A > R_O$  размеры октаэдрических пустот увеличиваются так, что туда помещаются катионы В с  $R_A > 0.41R_O$  и ионы О оказываются раздвинутыми. При  $R_A < R_O$  ионы А становятся меньшими, чем полость с  $Z_A = 12$  и параметр кубической ячейки определяется в первую очередь величиной  $2(R_B + R_O)$ . Следовательно, в структуре перовскита величины пустот с  $Z_A = 12$  и  $Z_B = 6$  взаимосвязаны, и данная особенность определяет широкую приспособляемость ее к ионам разных размеров. И поэтому соединения со структурой типа перовскита распространены очень широко и число известных простых и сложных по составу кристаллов, которые принадлежат этому семейству, насчитывает несколько тысяч. Предельные значения  $t$  для оксидов меняются  $1.0 \geq t \geq 0.8$ .

Однако толеранс-фактор недостаточен для полного описания состояния связей в структуре перовскита. Более точные сведения о состоянии связей А–О, В–О, О–О можно получить из геометрических соотношений (рис. 1). При отличии соотношений радиусов ионов от идеальных (1), параметр решетки кристалла определяется одним из следующих выражений:

$$2(R_B + R_O) = a, \sqrt{2}(R_A + R_O) = a, 2\sqrt{2}R_O = a, \quad (3)$$

в зависимости от того, какие из рассматриваемых пар ионов в данном соединении наиболее тесно соприкасаются между собой. Тогда величины:

$$S_{AO} = a_0 / \sqrt{2}(R_A + R_O), S_{BO} = a_0 / \sqrt{2}(R_B + R_O), S_{OO} = a_0 / 2\sqrt{2}R_O, \quad (4)$$

где  $a_0$  – экспериментальное значение параметра (кубической) решетки, характеризует степень напряженности каждой из связей. Действительно, для идеальной упаковки ( $R_A = R_O, R_B = 0.41R_O$ )  $S_{AO} = S_{BO} = S_{OO} = 1$ . При  $S_{ik} < 1$  связи напряжены, при  $S_{ik} > 1$  ионам типа  $i$  свободно в такой упаковке. Ясно, что в любом кристалле  $ABO_3$ , по крайней мере, одна из величин  $S_{ik} \leq 1$ . Значение  $a_0$ , выпадающее из соотношения  $t = S_{BO} / S_{AO}$  характеризует решетку реального кристалла. Помимо кристаллов с правильной структурой перовскита различают еще множество схожих структур, в которых также наблюдаются малые смещения атомов из частных положений в кубической ячейке. Эти структуры носят названия кристаллов семейства перовскита. Во всех кристаллах семейства перовскита сохраняются важнейшие признаки структуры правильного перовскита: кубическая упаковка слоев  $AO_3$  и заполнение ионами В всех октаэдров, которые связаны вершинами в трехмерный каркас [2, 3, 4].

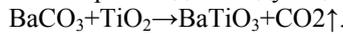
Во всех перовскитоподобных соединениях основной причиной возникновения

сегнетоелектричества являються различные изменения октаэдра  $\text{VO}_6$  в структуре  $\text{ABO}_3$ . В идеальной перовскитной структуре межатомные расстояния одинаковы и ни при каких условиях сегнетоелектричество не может наблюдаться. В случае отклонений от идеальной структуры происходят значительные смещения атомов, и при этом происходит спонтанная поляризация, в результате чего возникает сегнетоелектричество. Поэтому перовскиты считаются сегнетоэлектриками типа смещения. Искаженный кристалл принадлежит к одному из полярных классов тетрагональной, ромбической и ромбоэдрической систем. Все полярные искажения структуры устраняются при повышении температуры, а направление дипольных моментов, появляющихся при смещении, ионов, может быть изменено внешним электрическим полем. Искажениями такого типа обладают многие представители окисных сегнетоэлектриков и антисегнетоэлектриков:  $\text{BaTiO}_3$  [5],  $\text{PbTiO}_3$  [6],  $\text{Pb}_2\text{MgWO}_6$  [7] и др.

**2.2. Синтез и спекание сегнетоэлектрической керамики титаната бария**

Керамические образцы титаната бария получают стандартным методом твердофазной реакции [8]. Кинетика образования при твердофазном синтезе новых структур определяется коэффициентами диффузии атомов и их зависимостью от температуры, образованием в реакционной зоне фаз постоянного и переменного состава и т.д. К сожалению, несмотря на исследования физико-химических процессов образования окисных перовскитов, до настоящего времени не проведены теоретические оценки необходимой совокупности термодинамических параметров для успешного синтеза перовскитов любого задаваемого состава. Большинство сложноокисных материалов получают по твердофазной технологии в реакциях типа оксид-оксид, оксид-гирдоксид или оксид-углекислоты [9].

Керамику  $\text{BaTiO}_3$  получают обычно путем спекания при высокой температурой 1573-1673 К эквимолекулярной смеси  $\text{BaCO}_3$  и  $\text{TiO}_2$ . При этом происходит следующая реакция:



Более подробное описание режима синтеза приведено в работах [10-13].

В табл. 1 приведены структурные параметры перовскитовых фаз  $\text{BaTiO}_3$ , образующихся после отжига при разных температурах. Можно видеть, что низкотемпературный отжиг  $\text{BaTiO}_3$  (до 923 К) гетт-смеси приводит к образованию кубической фазы. Причем с повышением температуры отжига при комнатной температуре уменьшается параметр  $a$  ячейки. Отжиг в интервале температур  $1023 \text{ K} \leq T_{\text{отж}} \leq 1473 \text{ K}$  приводит к существованию при комнатной температуре тетрагональной фазы  $\text{BaTiO}_3$  с увеличением спонтанной деформации (тетрагональное искажение) при увеличении  $T_{\text{отж}}$  [14].

Таблица 1

**Структурные параметры  $\text{BaTiO}_3$  синтезированных при различных температурах**

Фазы	Температуры синтеза	Параметры ячейки		Объем ячейки	Спонтанная деформация
	$T_{\text{отж}}$ , К	$a$ , Å	$c$ , Å	$V_{\text{яч}}$ , Å <sup>3</sup>	$c/a-1$
Кубическая	723	4.067(2)	–	67.3(1)	–
	763	4.058	–	66.8	–
	823	4.040	–	65.9	–
	923	4.028	–	65.4	–
Тетрагональная	1023	4.027	4.032	65.4	0.001(1)
	1123	4.025	4.031	65.3	0.002
	1223	4.022	4.029	65.2	0.002
	1473	4.014	4.029	64.9	0.004

**2.3. Влияние высокой температуры на кристаллическую структуру  $\text{BaTiO}_3$**

Титанат бария  $\text{BaTiO}_3$  является одним из наиболее известных и изученных сегнетоэлектриков со структурой типа перовскита [15-17]. Открытие в 1945 г. Вулом и Гольдманом сегнетоэлектричества в кристалле  $\text{BaTiO}_3$ , не содержащем водорода, в существенной степени изменило физическое понимание данного явления [18]. Композитные материалы на основе сегнетоэлектрических наночастиц титаната бария  $\text{BaTiO}_3$  являются перспективными материалами для создания конденсаторов, обладая одновременно высокими значениями диэлектрической проницаемости и напряжения пробоя, а также хорошими механическими свойствами [5; 19; 20].

Относительная простота кристаллической структуры типа перовскита делает титанат бария удобным модельным объектом для построения теоретических моделей сегнетоэлектрического эффекта в ионных кристаллах [21; 22]. Развитие сегнетоэлектрического эффекта в титанате бария связано с искажением кислородного октаэдра в тетрагональной кристаллической структуре с соответствующими изменениями положения атомов кислорода и титана.

При нормальном давлении в диапазоне температур 0-180 К кристаллические структуры  $\text{BaTiO}_3$  соответствуют ромбоэдрической кристаллической структуре симметрии  $R3m$ . При повышении температуры наблюдается следующая последовательность структурных фазовых переходов: Ромбоэдрический  $R3m$  (180 К) → Орторомбический  $Amm2$  (263 К) → Тетрагональный  $P4mm$  (403 К) → Кубический  $Pmm$  [23].

В низкотемпературных фазах  $\text{BaTiO}_3$ , обладающих сегнетоэлектрическими свойствами [24], ион

титана смещается из центра элементарной ячейки, а следовательно, из центра октаэдра  $TiO_6$  и возникает спонтанная поляризация – появление в низкотемпературных фазах электрических диполей Ti-O. В соседних доменах диполи ориентированы параллельно друг другу. Спонтанная поляризация происходит вдоль полярных осей (рис. 2), число эквивалентных осей спонтанной поляризации типа  $[100]$  равно 6 в тетрагональной, 12 осей типа  $[110]$  в орторомбической и 8 осей типа  $[111]$  в ромбоэдрической фазах [25; 26].

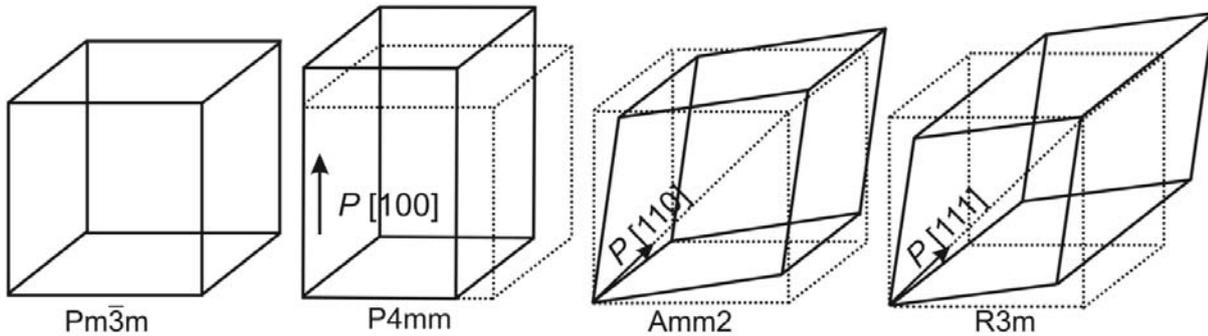


Рис. 2. Элементарная ячейка титаната бария. Стрелками показаны направления полярных осей в спонтанно поляризованных модификациях

На рис. 3 представлены температурные зависимости параметров элементарной ячейки для каждой фаз  $BaTiO_3$  [27].

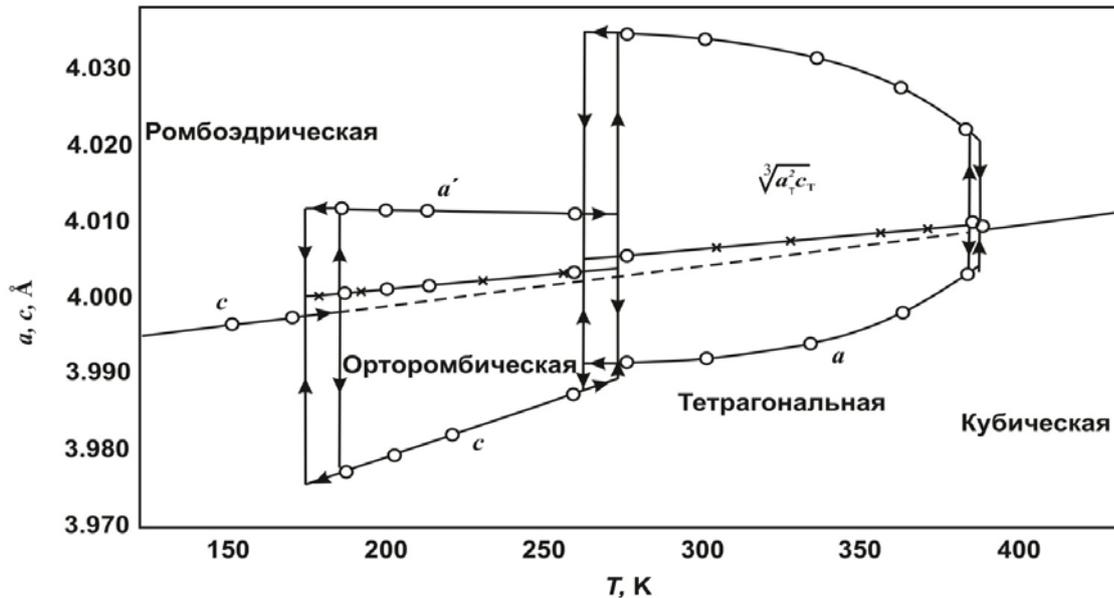


Рис. 3. Температурные зависимости параметров элементарной ячейки ромбоэдрической, тетрагональной, орторомбической и кубической фазы титаната бария при нормальном давлении

### 2.3.1. Кубическая фаза

В параэлектрической фазе кристаллическая структура  $BaTiO_3$  обладает кубической симметрией с пространственной группой  $Pm\bar{3}m$  [29-31]. При температуре  $T = 406$  К параметры элементарной ячейки имеют значения  $a = 4.009$  Å [30]. Все атомы в данной структуре находятся в частных положениях: Ba : (0, 0, 0); Ti : ( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}$ ); 3O : ( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}$ , 0), ( $\frac{1}{2}$ , 0,  $\frac{1}{2}$ ), (0,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}$ ). Иногда бывает удобным представлять перовскитовую структуру с несколько другой точки зрения, а именно выбирая начало в атоме Ba. Каждый атом бария окружен шестью атомами кислорода, расположенными в вершинах правильного октаэдра. Октаэдры, связанные своими вершинами, образуют трехмерный каркас а возникающие большие полости заняты атомами свинца. Однако с кристаллохимической точки зрения перовскитовую структуру удобнее рассматривать как гранцентрированную кубическую плотнейшую упаковку ионов  $Ba^{2+}$  и  $O^{2-}$ . В плотнейших упаковках имеются два типа полостей: тетраэдрические и октаэдрические. В кристаллах  $BaTiO_3$  ионы  $Ti^{4+}$  заселяют только октаэдры, образованные ионами  $O^{2-}$ , причем эти октаэдры связаны своими вершинами [32].

Температурная зависимость изменения значения объема элементарной ячейки для кубической фазы носит линейный характер [29]:  $V = 64.4576 + 0.00218 T$ . Рассчитанные значения объемного коэффициента

теплового расширения  $\alpha = 1/V(dV/dT)_p$  для кубической фазы:  $\alpha = 3.382110^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

### 2.3.2. Тетрагональная фаза

При температурах ниже 403 К  $\text{BaTiO}_3$  переходит в фазу с пространственной группой  $P4mm$  и приобретает тетрагональную симметрию [33-35]. Это фазовый переход связанный с переходом из параэлектрической в кубическую фазу и является фазовым переходом первого рода [22]. Сегнетоэлектрическое состояние в  $\text{BaTiO}_3$  обусловлено смещением атомов. Атомы смещаются из своих начальных положений вдоль одной из осей  $|001|$ . При этом происходят тетрагональные искажения параметров решетки и именно в результате этого тетрагонального искажения происходят определенные превращения в октаэдре  $\text{TiO}_6$ , образованные атомами Ti и O. Вследствие этого в кристалле  $\text{BaTiO}_3$  происходит спонтанная поляризация и возникает сегнетоэлектричество. При нормальных условиях параметры элементарной ячейки имеют значения  $a = 3.994 \text{ \AA}$  и  $c = 4.036 \text{ \AA}$ , параметр тетрагонального искажения  $c/a = 1.011$  [36]. Полученные кристаллические данные при комнатной температуре от рентгеновской дифрактограммы показаны в таблице 2 [33].

Таблица 2

**Информация о расчетной рентгеновской дифрактограммы  $\text{BaTiO}_3$  в тетрагональной  $P4mm$  фазе при комнатной температуре (h, k, l – индексы Миллера,  $2\theta$  – угол дифракции,**

**$d_{hkl}$  – межплоскостное расстояние,  $|F(hkl)|$  – структурный фактор, FWHM – полная ширина на уровне половинной амплитуды)**

<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	$2\theta$	$d_{hkl} (\text{Å})$	$ F(hkl) $	<i>FWHM</i>
1	0	0	25.651	4.0296	22.37	0.138
1	0	1	36.76	2.83687	55.1	0.1575
1	1	0	36.926	2.82454	54.92	0.1578
1	1	1	45.504	2.31292	42.81	0.1767
0	0	2	52.714	2.0148	68.31	0.1951
2	0	0	53.214	1.99725	68.24	0.1965
1	0	2	59.636	1.79892	21.14	0.215
2	1	0	60.097	1.78639	20.96	0.2164
1	1	2	66.096	1.64026	44.99	0.2357
2	1	1	66.423	1.63311	45.44	0.2368
2	0	2	78.193	1.41843	55.9	0.2808
2	2	0	78.6	1.41227	55.88	0.2825
0	0	3	83.51	1.3432	20.89	0.3037
2	1	2	84.012	1.33666	20.15	0.306
1	0	3	89.271	1.27315	39.73	0.3313

Координаты атомов в этой структуре могут быть выражены через три параметра  $\delta z_{Ti}$ ,  $\delta z_{O1}$  и  $\delta z_{O2}$ , представляющие собой смещения этих атомов из своих первоначальных положений: Ba : (0, 0, 0); Ti : ( $1/2$ ,  $1/2$ ,  $1/2 + \delta z_{Ti}$ ); O1 : ( $1/2$ ,  $1/2$ ,  $\delta z_{O1}$ ), O2 : ( $1/2$ , 0,  $1/2 + \delta z_{O2}$ ), (0,  $1/2$ ,  $1/2 + \delta z_{O2}$ ) [32]. Для тетрагональной фазы рассчитанные на основе экспериментальных данных значения параметров элементарной ячейки и координаты атомов представлены в таблице 3 [37].

Таблица 3

**Структурные параметры в тетрагональной  $P4mm$  фазе соединения  $\text{BaTiO}_3$**

Параметры	Температура образцы, К				
	280	290	300	320	350
Параметры решетки					
<i>a</i> , Å	3.9970(5)	3.9925(5)	3.99095(29)	3.9938(3)	3.9956(5)
<i>c</i> , Å	4.0314(6)	4.0365(5)	4.0352(3)	4.0361(3)	4.0354(5)
Объем ячейки <i>V</i> , Å <sup>3</sup>	64.406(26)	64.341(24)	64.271(14)	64.378(16)	64.426(24)
Координаты атомов					
Ba (0, 0, 0)					
Ti ( $1/2$ , $1/2$ , $1/2 + \delta z_{Ti}$ )					
$\delta z_{Ti}$	0.0203(10)	0.0215(10)	0.0224(6)	0.0215(7)	0.0195(11)
O1 ( $1/2$ , $1/2$ , $\delta z_{O1}$ )					
$\delta z_{O1}$	-0.0258(6)	-0.0253(6)	-0.0244(4)	-0.0233(5)	-0.0251(7)
O2 ( $1/2$ , 0, $1/2 + \delta z_{O2}$ )					
$\delta z_{O2}$	-0.0123(10)	-0.0105(9)	-0.0105(5)	-0.0095(6)	-0.0110(10)

Температурная зависимость изменения значения объема элементарной ячейки для тетрагональной фазы носит линейный характер [30]:  $V = 64.2665 + 0.00173 T$ . Рассчитанные значения объемного

коэффициента теплового расширения  $\alpha = 1/V(dV/dT)_p$  для кубической фазы:  $\alpha = 2.691910^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

### 2.3.3. Орторомбическая фаза

При температуре  $T = 263 \text{ K}$  в титаната барию наблюдается следующий фазовый переход в орторомбическую фазу с пространственной группой  $Amm2$  [37, 38]. Оси  $a$  и  $b$  параллельны диагоналям грани псевдокубической ячейки,  $a$  ось  $c$  параллельна ее ребру. Полярная ось параллельна оси, обозначенной через  $a$ , т.е. длинной диагонали грани псевдокубической ячейки. Положения атомов могут быть рассчитаны через смещения атомов из исходных положений, находящихся на элементах симметрии кубической фазы. Искажение кислородных октаэдров в тетрагональной и орторомбической фазах очень невелико, можно считать, что в обеих фазах это небольшое искажение обусловлено смещениями Ti и Ba вдоль полярной оси [32]. Орторомбическая фаза также сегнетоэлектрическая фаза, направление спонтанной поляризации оказывается параллельным одному из направлений  $|110|$  исходной кубической фазы [30].

Координаты атомов в этой структуре могут быть выражены через четыре параметра  $\delta z_{Ti}$ ,  $\delta z_{O1}$ ,  $\delta y_{O2}$  и  $\delta z_{O2}$ , представляющие собой смещения этих атомов из своих первоначальных положений: 2Ba : (0, 0, 0), (0,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}$ ); 2Ti : ( $\frac{1}{2}$ , 0,  $\frac{1}{2} + \delta z_{Ti}$ ), ( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\delta z_{Ti}$ ); 2O1 : (0, 0,  $\frac{1}{2} + \delta z_{O1}$ ), (0,  $\frac{1}{2}$ ,  $\delta z_{O1}$ ); 4O2 : ( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4} + \delta y_{O2}$ ,  $\frac{1}{4} + \delta z_{O2}$ ), ( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4} + \delta y_{O2}$ ,  $\frac{3}{4} + \delta z_{O2}$ ), ( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4} - \delta y_{O2}$ ,  $\frac{1}{4} + \delta z_{O2}$ ), ( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4} - \delta y_{O2}$ ,  $\frac{3}{4} + \delta z_{O2}$ ) [38].

Для орторомбической фазы рассчитанные на основе экспериментальных данных значения параметров элементарной ячейки и координаты атомов представлены в табл. 4 [35].

Таблица 4

Структурные параметры в орторомбической  $Amm2$  фазе соединения  $BaTiO_3$

Параметры	Температура образцы, К				
	190	210	230	250	270
Параметры решетки					
$a, \text{Å}$	3.9828(3)	3.9806(5)	3.9841(3)	3.9855(5)	3.9874(3)
$b, \text{Å}$	5.6745(5)	5.6710(8)	5.6741(5)	5.6738(8)	5.6751(5)
$c, \text{Å}$	5.6916(5)	5.6904(8)	5.6916(5)	5.6903(8)	5.6901(5)
Объем ячейки $V, \text{Å}^3$	128.63(3)	128.46(5)	128.66(3)	128.67(5)	128.76(3)
Координаты атомов					
Ba (0, 0, 0)					
Ti ( $\frac{1}{2}$ , 0, $\frac{1}{2} + \delta z_{Ti}$ )					
$\delta z_{Ti}$	0.0170(5)	0.0143(10)	0.0079(8)	0.0124(13)	0.0169(6)
O1 (0, 0, $\frac{1}{2} + \delta z_{O1}$ )					
$\delta z_{O1}$	-0.0110(6)	-0.0110(3)	-0.0146(6)	-0.0091(12)	-0.0090(8)
O2 ( $\frac{1}{2}$ , $\frac{1}{4} + \delta y_{O2}$ , $\frac{1}{4} + \delta z_{O2}$ )					
$\delta y_{O2}$	0.0061(3)	0.0061(6)	0.0044(3)	0.0067(6)	0.0060(4)
$\delta z_{O2}$	-0.0157(4)	-0.0167(7)	-0.0189(4)	-0.0146(8)	-0.0140(5)

### 2.3.4. Ромбоэдрическая фаза

При температурах ниже 180 К  $BaTiO_3$  переходит в фазу с пространственной группой  $R3m$  и приобретает ромбоэдрическую симметрию. При температуре  $T = 180 \text{ K}$  параметры элементарной ячейки имеют значения  $a = 4.0043(3) \text{ Å}$ ,  $\alpha = 89.855(1)^\circ$  [37].

Изучение ромбоэдрической фазы осложнено тремя экспериментальными трудностями: она существует только при низких температурах, в этой фазе все образцы сильно сдвойникованы, весьма сложно получить пластинки перпендикулярные псевдокубическому направлению осей  $|111|$ . Ромбоэдрическое искажение исходной кубической элементарной ячейки состоит в ее растяжении по одной из пространственных диагоналей [32].

Координаты атомов в этой структуре могут быть выражены через три параметра  $\delta z_{Ti}$ ,  $\delta x_O$  и  $\delta z_O$ , представляющие собой смещения этих атомов из своих первоначальных положений: Ba : (0, 0, 0); Ti : ( $\frac{1}{2} + \delta z_{Ti}$ ,  $\frac{1}{2} + \delta z_{Ti}$ ,  $\frac{1}{2} + \delta z_{Ti}$ ); 3O : ( $\frac{1}{2} + \delta z_O$ ,  $\frac{1}{2} + \delta z_O$ ,  $\delta x_O$ ), ( $\frac{1}{2} + \delta z_O$ ,  $\delta x_O$ ,  $\frac{1}{2} + \delta z_O$ ), ( $\delta x_O$ ,  $\frac{1}{2} + \delta x_O$ ,  $\frac{1}{2} + \delta z_O$ ) [36].

Для ромбоэдрической фазы рассчитанные на основе экспериментальных данных значения параметров элементарной ячейки и координаты атомов представлены в табл. 5 [35].

### 2.4. Влияние высокого давления на кристаллическую структуру $BaTiO_3$

В работе [37] проведено исследование кристаллической структуры соединения  $BaTiO_3$  методом рентгеновской дифракции при высоких давлениях до 5.07 ГПа и комнатной температуре.

При комнатной температуре и нормальном давлении дифракционный спектр соответствует тетрагональной кристаллической структуре с симметрией  $P4/m$ . С повышением давления  $P \approx 2.1 \text{ ГПа}$  происходят заметные изменения в рентгеновских спектрах  $BaTiO_3$ . Эти изменения связаны со структурным фазовым переходом из антисегнетоэлектрической орторомбической фазы в параэлектрическую кубическую. Кристаллическая структура параэлектрической фазы описывается кубической симметрией с

пространственной группой  $R\bar{3}m$ . Параметры элементарной ячейки для второй кубической фазы при давлении  $P=2,16$  ГПа составили  $a=3,9931(4)$  Å. Барическая зависимость параметров и объема элементарной ячейки  $\text{BaTiO}_3$  представлены на рис. 4 и 5.

Таблица 5

**Структурные параметры в ромбоэдрической  $R\bar{3}m$  фазе соединения  $\text{BaTiO}_3$**

Параметры	Температура образцы, К				
	15	20	40	70	100
Параметры решетки					
$a$ , Å	4.00360(25)	4.0036(4)	4.0035(4)	4.0042(4)	4.0042(4)
$\alpha$ , °	89.839(1)	89.840(2)	89.843(2)	89.837(2)	89.836(2)
Объем ячейки $V$ , Å <sup>3</sup>	64.172(12)	64.170(18)	64.168(19)	64.200(19)	64.201(20)
Координаты атомов					
Ba (0, 0, 0)					
Ti ( $\frac{1}{2}+\delta x_{Ti}$ , $\frac{1}{2}+\delta x_{Ti}$ , $\frac{1}{2}+\delta x_{Ti}$ )					
$\delta x_{Ti}$	-0.0128(4)	-0.0120(7)	-0.0153(6)	-0.0155(6)	-0.0107(5)
O ( $\frac{1}{2}+\delta x_O$ , $\frac{1}{2}+\delta x_O$ , $\delta z_O$ )					
$\delta x_O$	0.0109(4)	0.0116(5)	0.0088(6)	0.0086(6)	0.0113(7)
$\delta z_O$	0.01930(23)	0.0195(3)	0.0183(4)	0.0175(4)	0.0200(3)
Параметры	Температура образцы, К				
	130	150	170	180	
Параметры решетки					
$a$ , Å	4.00385(25)	4.0057(4)	4.0041(3)	4.0043(3)	
$\alpha$ , °	89.843(1)	89.846(2)	89.852(1)	89.855(1)	
Объем ячейки $V$ , Å <sup>3</sup>	64.184(12)	64.272(21)	64.196(12)	64.206(12)	
Ba (0, 0, 0)					
Ti ( $\frac{1}{2}+\delta x_{Ti}$ , $\frac{1}{2}+\delta x_{Ti}$ , $\frac{1}{2}+\delta x_{Ti}$ )					
$\delta x_{Ti}$	-0.0147(4)	-0.0136(6)	-0.0140(4)	-0.0130(5)	
O ( $\frac{1}{2}+\delta x_O$ , $\frac{1}{2}+\delta x_O$ , $\delta z_O$ )					
$\delta x_O$	0.0088(4)	0.0093(6)	0.0084(4)	0.0092(5)	
$\delta z_O$	0.0185(2)	0.0181(4)	0.0185(3)	0.0189(3)	

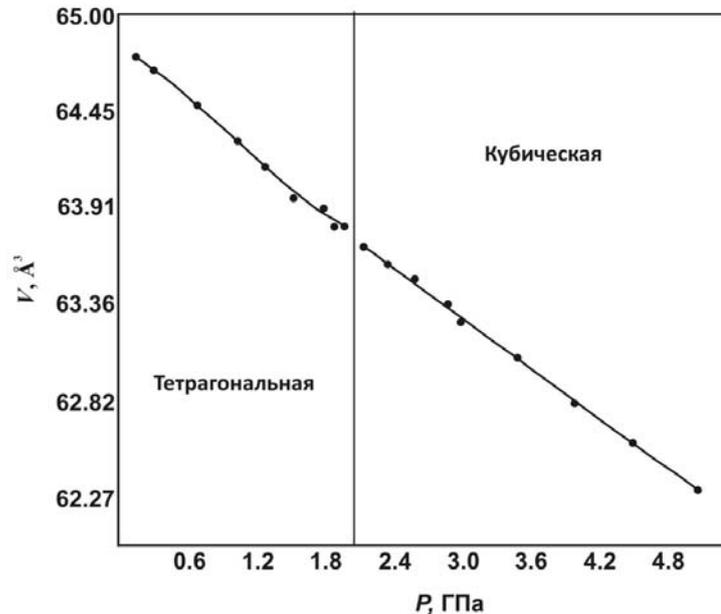


Рис. 4. Барические зависимости параметров элементарной ячейки  $\text{BaTiO}_3$  тетрагональной ( $a_T$ ,  $c_T$ ) и кубической ( $a_K$ ) фазы  $\text{BaTiO}_3$ . Данные для каждой фазы представлены при комнатной температуре.

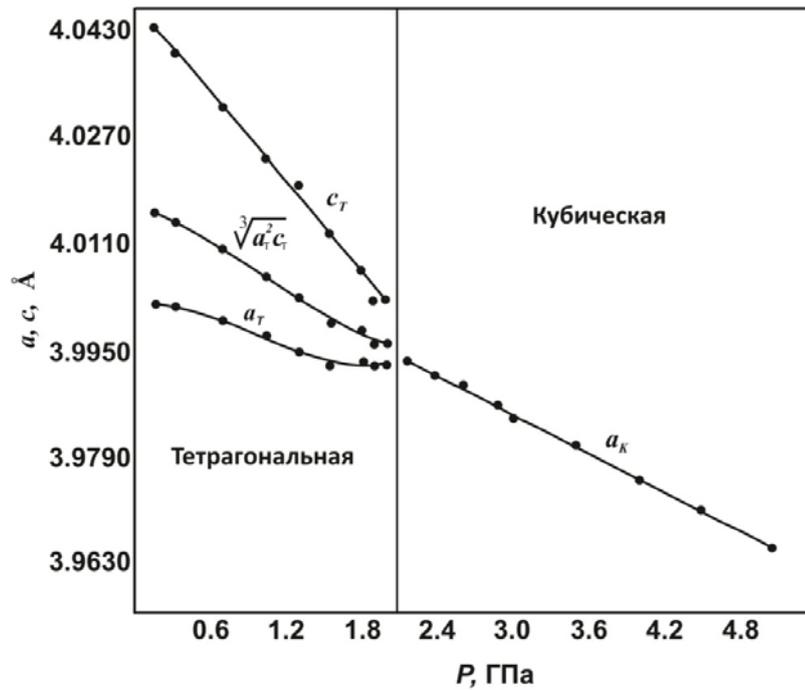


Рис. 5. Зависимость объема элементарной ячейки для тетрагональной и кубической фаз от давления BaTiO<sub>3</sub>. Данные для каждой фазы представлены при комнатной температуре.

Значения рис. 4, 5 представлены в табл. 6 [37].

Таблица 6

Кристаллографические параметры BaTiO<sub>3</sub> при различных давлениях

P, ГПа	a, Å	c, Å	c/a	V, Å <sup>3</sup>	(a <sup>2</sup> c) <sup>1/3</sup> , Å
0.16	4.0019(5)	4.0430(5)	1.0103(2)	64.75(2)	4.0156(4)
0.32	4.0013(5)	4.0392(5)	1.0095(2)	64.67(2)	4.0139(4)
0.70	3.9992(4)	4.0313(4)	1.0080(1)	64.48(1)	4.0099(3)
1.05	3.9968(4)	4.0235(4)	1.0067(1)	64.27(1)	4.0057(3)
1.30	3.9945(5)	4.0194(5)	1.0062(2)	64.13(2)	4.0028(4)
1.55	3.9924(4)	4.0123(4)	1.0050(1)	63.95(1)	3.9990(3)
1.80	3.9931(4)	4.0067(4)	1.0034(1)	63.89(1)	3.9976(3)
1.90	3.9924(4)	4.0023(4)	1.0025(1)	63.79(1)	3.9957(3)
2.00	2.9924(5)	4.0022(5)	1.0025(2)	63.79(2)	3.9957(4)
2.16	3.9931(4)		1.0000	63.67(2)	
2.37	3.9910(4)		1.0000	63.57(2)	
2.60	3.9894(4)		1.0000	63.49(2)	
2.88	3.9863(4)		1.0000	63.35(2)	
3.00	3.9843(6)		1.0000	63.25(3)	
3.50	3.9803(5)		1.0000	63.06(2)	
4.00	3.9749(4)		1.0000	62.80(2)	
4.50	3.9705(5)		1.0000	62.59(2)	
5.07	3.9645(6)		1.0000	62.31(3)	

Зависимости объема элементарной ячейки для тетрагональной и кубической фазы титаната бария были аппроксимированы уравнением состояния Берча-Мурнагана [38]:

$$P = \frac{3}{2} B_0 (x^{-7/3} - x^{-5/3}) [1 + \frac{3}{4} (B' - 4)(x^{-2/3} - 1)] \quad (5)$$

где  $x=(V/V_0)$  – относительное изменение объема,  $V_0$  – объем элементарной ячейки при  $P=0$ ,  $B_0$  и  $B'$  – эмпирические параметры, имеющие смысл модуля всестороннего сжатия в состоянии равновесия и его первой производной по давлению. Их рассчитанные значения для каждой фазы BaTiO<sub>3</sub> представлены в табл. 7.

Эмпирические параметры, имеющие смысл модуля всестороннего сжатия (В) в состоянии равновесия и его первой производной по давлению (В') при различных фазах

Фаза	$V_0, \text{Å}^3$	$B, \text{ГПа}$	$B'$	Литература
Кубическая	64.00	162		[39]
		135	6.4	[40]
	65.85	160.84	4.5	[36]
	64.28	167.64	4.45	[41]
	61.30	189		[34]
	60.93	194.2	3.68	[42]
	65.45	169		[43]
Тетрагональная	67.50	82.94		[36]
	65.95	96.60		[41]
Орторомбическая	67.81	87.39		[36]
	66.02	97.54		[41]
Ромбоэдрическая	67.76	94.62		[36]
	65.99	103.50		[41]

2.5. Структурные исследования Р-Т фазовой диаграммы ниобата натрия

При нормальных условиях, вплоть до температуры фазового перехода ( $T_C = 403 \text{ К}$ )  $\text{BaTiO}_3$  проявляет сегнетоэлектрические свойства. При температурах свыше  $T_C$  наблюдается структурный фазовый переход сегнетоэлектрик-параэлектрик с образованием параэлектрической фазы. Воздействие высоких давлений может смещать критическую температуру фазового перехода. В работе [37] показано, что в условиях  $P \approx 2 \text{ ГПа}$  переход сегнетоэлектрик-параэлектрик имеет место при комнатной температуре. Установлено, что высокое давление приводит к заметному уменьшению температуры переходы из тетрагональной сегнетоэлектрической в кубическую фазу со средним барическим коэффициентом  $dT_C/dP = -46 \text{ К/ГПа}$ .

В работах по исследованию Р-Т фазовых диаграмм, полученных для  $\text{BaTiO}_3$ , есть много несоответствий [39]. В работах [39-42] указано, что при  $P = 6.5 \text{ ГПа}$  и  $T = 130 \text{ К}$  имеет место критическая точка, в которой могут сосуществовать кубическая, тетрагональная, орторомбическая и ромбоэдрическая фазы (рис. 6).

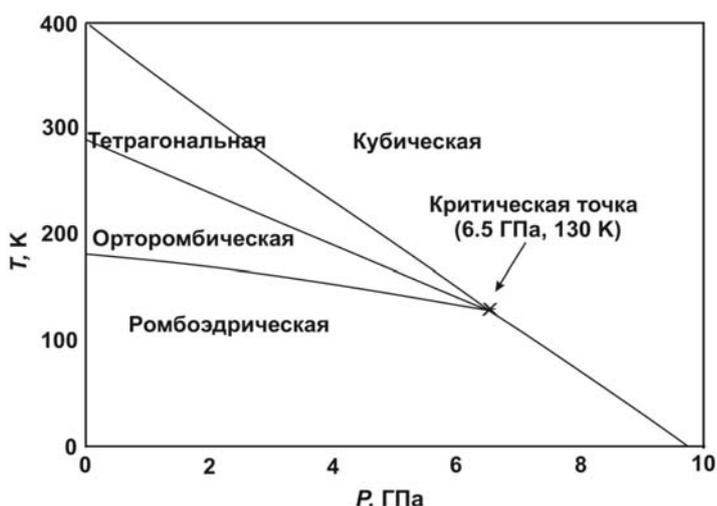


Рис. 6. Р-Т фазовая диаграмма титаната бария в диапазоне давлений 0-10 ГПа и температур 0-400 К.

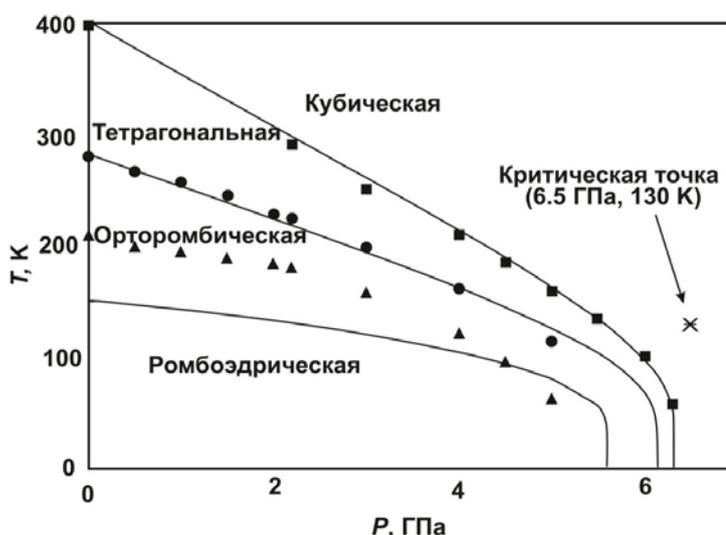


Рис. 7. Р-Т фазовая диаграмма титаната бария в диапазоне давлений 0-7 ГПа и температур 0-400 К.

Однако в работах [39; 43] эта точка осталась вне Р-Т фазовой диаграммы и существование такой

критической точки опровергнуто (рис. 7).

### 3. Выводы

1. При высокой температуре  $T=406$  К в сегнетоэлектрике  $\text{BaTiO}_3$  обнаружен структурный фазовый переход от тетрагональной кристаллической структуры с пространственной группой  $R4/m$  (сегнетоэлектрическая фаза) к высокотемпературной кубической структуре с пространственной группой  $R\bar{3}m$  (параэлектрическая фаза).

2. При низкой температуре  $T=263$  К в  $\text{BaTiO}_3$  обнаружен структурный фазовый переход от тетрагональной кристаллической структуры с пространственной группой  $R4/m$  (сегнетоэлектрическая фаза) к низкотемпературной орторомбической структуре с пространственной группой  $Amm2$  (сегнетоэлектрическая фаза) и при температуре  $T=180$  К к низкотемпературной ромбоэдрической структуре с пространственной группой  $R3m$  (сегнетоэлектрическая фаза).

3. При высоком давлении  $P=2,16$  ГПа и комнатной температуре в  $\text{BaTiO}_3$  происходит фазовый переход из тетрагональной фазы с пространственной группой  $R4/m$  (сегнетоэлектрическая фаза) в кубическую фазу с пространственной группой  $R\bar{3}m$  (параэлектрическая фаза).

4. В сегнетоэлектрике  $\text{BaTiO}_3$  температура фазового перехода из моноклинной в орторомбическую фазу уменьшается при давлении с коэффициентом  $dT_c/dP=-46$  К/ГПа.

5. Р-Т фазовой диаграммы сложного оксида  $\text{BaTiO}_3$  требует исследования в широком диапазоне давлений и температур.

### Литература

- Liu X. X-ray powder diffraction study of  $\text{CaTiO}_3$  perovskite at high temperatures / X. Liu, R.C. Liebermann // *Phys. and Chem. of Min.* – 1993. – 20. – №3. – P. 171-175.
- Фазовые переходы в кристаллах галоидных соединений  $\text{ABX}_3$  / К.С. Александров, А.Т. Анистратов, Б.В. Безносиков, Н.В. Федосеева. – Новосибирск : Наука, 1981. – 262 с.
- Александров К.С. Перовскитоподобные кристаллы (иерархия структур, многообразие физических свойств, возможности синтеза новых соединений) / К.С. Александров, Б.В. Безносиков. – Новосибирск : Наука, 1997. – 217 с.
- Александров К.С. Перовскиты. Настоящее и будущее (многообразие прафаз, фазовые превращения, возможности синтеза новых соединений) / К.С. Александров, Б.В. Безносиков. – Новосибирск : Наука, 2004. – 232 с.
- Crystal structure and the paraelectric-to-ferroelectric phase transition of nanoscale  $\text{BaTiO}_3$  / M.B. Smith, K. Page, T. Siegrist [et al] // *J. Am. Chem. Soc.* – 2008. – 130. – №22. – P. 6955-6963.
- High-pressure effect on the ferroelectric-paraelectric transition in  $\text{PbTiO}_3$  / S.G. Jabarov, D.P. Kozlenko, S.E. Kichanov [et al] // *Phys. of the Sol. Stat.* – 2011. – 53. – №11. – P. 2300-2304.
- Structural aspects of the antiferroelectric-paraelectric phase transition in double perovskite  $\text{Pb}_2\text{MgWO}_6$  at high pressures and temperatures / R.Z. Mekhdieva, E.V. Lukin, S.E. Kichanov [et al] // *Phys. of the Sol. Stat.* – 2014. – 56. – №4. – P. 765-770.
- Третьяков Ю.Д. Твердофазные реакции / Ю.Д. Третьяков // *Соросовский образовательный журнал.* – 1999. – №4. – С. 35-39.
- Панич А.Е. Физика сегнетоэлектрической керамики / А.Е. Панич, Т.Г. Левина. – Ростов-на-Дону : РГУ, 2002. – 45 с.
- Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков / К. Окадзаки. – М. : Энергия, 1976. – 327 с.
- Potdar H.S. Chemical coprecipitation of mixed (Ba + Ti) oxalates precursor leading to  $\text{BaTiO}_3$  powders / H.S. Potdar, S.B. Deshpande, S.K. Date // *Mater. Chem. Phys.* – 1999. – №58. – P. 121-127.
- Xu H. Tetragonal nanocrystalline barium titanate powder: preparation, characterization, and dielectric properties / H. Xu, L. Gao // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2003. – №86. – P. 203-205.
- Wet routes of high purity  $\text{BaTiO}_3$  nanopowder / L. Wang, L. Liu, D. Xue, H. Kang, C. Liu // *J. Alloys Comp.* – 2007. – №440. – P. 78-83.
- Чебанова Е.В. Особенности неоднородных структурных состояний  $\text{BaTiO}_3$  и  $\text{PbTiO}_3$  / Е.В. Чебанова, Ю.В. Кабиров, М.Ф. Куприянов // *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ».* – 2012. – №4. – С. 1-6.
- Strain modification of epitaxial perovskite oxide thin films using structural transitions of ferroelectric  $\text{BaTiO}_3$  substrate / M.K. Lee, T.K. Nath, C.B. Eoma, M.C. Smoak, F. Tsui // *App. Phys. Lett.* – 2000. – 77. – №22. – P. 3547-3549.
- Characterization of barium titanate ceramic powders by raman spectroscopy / Z. Lazerevic, N. Romcevic, M. Vijatovic [et al] // *Acta Phys. Pol. A.* – 2009. – 115. – №4. – P. 808-810.
- Tkacz-Smiesz K. Crystal-chemical aspects of phase transitions in barium titanate / K. Tkacz-Smiesz, A. Kolezynski, W.S. Ptak // *Sol. Stat. Comm.* – 2003. – №127. – P. 557-562.
- Смоленский Г.А. Физика сегнетоэлектрических явлений / Г.А. Смоленский. – Л. : Наука, 1985. – 396 с.
- A systematic study on electrical properties of the  $\text{BaTiO}_3$  – epoxy composite with different sized  $\text{BaTiO}_3$  as fillers / W. Yang, S. Yua, S. Luo, R. Sun, W.-H. Liao, C.-P. Wong // *J. Alloys and Comp.* – 2015. –

№620. – P. 315-323.

20. Xiao C.J. Crystal structure of dense nanocrystalline BaTiO<sub>3</sub> ceramics / C.J. Xiao, C.Q. Jin, X.H. Wang // *Materials Chemistry and Physics*. – 2008. – №111. – P. 209-212.
21. Ramirez R. Pressure dependence of free-energy expansion coefficient in PbTiO<sub>3</sub> and BaTiO<sub>3</sub> and tricritical-point behavior / R. Ramirez, M.F. Lapena, J.A. Gonzalo // *Phys. Rev. B*. – 1990. – 42. – №4. – P. 2604-2606.
22. Hayward S.A. The pressure–temperature phase diagram of BaTiO<sub>3</sub>: a macroscopic description of the low-temperature behavior / S.A. Hayward, E.K.H. Salje // *J. of Phys.: Cond. Matt.* – 2002. – 14. – №36. – P. L599-L604.
23. Ram S. Ferroelectric BaTiO<sub>3</sub> phase of orthorhombic crystal structure contained in nanoparticles / S. Ram, A. Jana, T.K. Kundu // *J. Appl. Phys.* – 2007. – №102. – P. 054-107.
24. Tkacz-Smiech K. Crystal-chemical aspects of phase transitions in barium titanate / K. Tkacz-Smiech, A. Koleziynski, W.S. Ptak // *Solid State Comm.* – 2003. – №127. – P. 557-562.
25. Гуртов В.А. Физика твердого тела для инженеров / В.А. Гуртов, Р.Н. Осауленко. – М. : Техносфера, 2007. – 520 с.
26. Горелик С.С. Материаловедение полупроводников и диэлектриков / С.С. Горелик, М.Я. Дашевский. – М. : МИСИС, 2003. – 480 с.
27. *Nanomaterials and Nanochemistry* / eds. C. Brechignac, P. Houdy, M. Lehmani. – Berlin : Springer, 2007. – 747 p.
28. Vijatovic M.M. History and challenges of barium titanate: part I / M.M. Vijatovic, J.D. Bobic, B.D. Stojanovic // *Science of Sintering*. – 2008. – №40. – P. 155-165.
29. Pradhan S. Study the crystal structure and phase transition of BaTiO<sub>3</sub> – a perovskite / S. Pradhan, G.S. Roy // *Researcher*. – 2013. – 5. – №3. – P. 63-67.
30. Иона Ф. Сегнетоэлектрические кристаллы / Ф. Иона, Д. Ширане. – М. : Мир, 1965. – 556 с.
31. Wodecka-Dus B. Fabrication and dielectric properties of donor doped BaTiO<sub>3</sub> ceramics / B. Wodecka-Dus, D. Czekaj // *Arch. of Met. and Mat.* – 2009. – 54. – №4. – P. 923-933.
32. Effect of microwave sintering on grain size and dielectric properties of barium titanate / P. Kuruva, U.M.S. Rajaputra, S. Sanyadanam, R.M. Sarabu // *Turk. J. Phys.* – 2013. – №37. – P. 312-321.
33. X-ray investigation, high-resolution electron holography, and density functional calculations of single-crystalline BaTiO<sub>3</sub> / A. Rother, M. Reibold, H. Lichte [et al] // *Phys. Rev. B*. – 2006. – №74. – P. 134116.
34. Ghosez P. First-principles characterization of the four phases of barium titanate / P. Ghosez, X. Gonze, J.-P. Michenaud // *Ferroelectrics*. – 1999. – №220. – P. 1-15.
35. Kwel G.H. Structures of the ferroelectric phases of barium titanate / G.H. Kwel, A.C. Lawson, S.J.L. Billinge // *J. Phys. Chem.* – 1993. – №97. – P. 2368-2377.
36. Uludogan M. First principles approach to BaTiO<sub>3</sub> / M. Uludogan, T. Cagin // *Turk. J. Phys.* – 2006. – №30. – P. 277-285.
37. Malinowski By. M. The influence of high hydrostatic pressure on lattice parameters of a single crystal of BaTiO<sub>3</sub> / By. M. Malinowski, K. Lukaszewicz, S. Asbrink // *J. Appl. Cryst.* – 1986. – №19. – P. 7-9.
38. Birch F.J. Equation of State and Thermodynamic Parameters of NaCl to 300 kbar in the High-temperature Domain / F.J. Birch // *J. Geophys. Res.* – 1986. – №91. – P. 4949-4954.
39. Hayward S.A. The pressure-temperature phase diagram of BaTiO<sub>3</sub>: a macroscopic description of the low-temperature behavior / S.A. Hayward, E.K.H. Salje // *J. Phys.: Condens. Matter*. – 2002. – №14. – P. L599-L604.
40. Samara G.A. Pressure and temperature dependences of the dielectric properties of the perovskites BaTiO<sub>3</sub> and SrTiO<sub>3</sub> / G.A. Samara // *Phys. Rev.* – 1966. – №151. – P. 378-386.
41. Samara G.A. Pressure and temperature dependence of the dielectric properties and phase transitions of the ferroelectric perovskites: PbTiO<sub>3</sub> and BaTiO<sub>3</sub> / G.A. Samara // *Ferroelectrics*. – 1971. – №2. – P. 277-289.
42. Decker D.L. Dielectric and polarization measurements on BaTiO<sub>3</sub> at high pressures to the tricritical point / D.L. Decker // *Phys. Rev. B*. – 1989. – №39. – P. 2432-2438.
43. Ishidate T. Phase diagram of BaTiO<sub>3</sub> / T. Ishidate, S. Abe, H. Takahashi, N. Mori // *Phys. Rev. Lett.* – 1997. – №78. – P. 2397-2400.

## References

1. Liu X., Liebermann R. C. *Phys. and Chem. of Min.* 1993, 20, No. 3: 171.
2. Aleksandrov K. S., Anistratov A. T., Beznosikov B. V., and Fedoseeva N. V. *Fazovyе perehody v kristallah galoidnyh soedinenij ABX3* [Phase transitions in crystals halides ABX3]. Novosibirsk: Nauka, 1981.
3. Aleksandrov K. S. and Beznosikov B. V., *Perovskitopodobnye kristally (ierarhiya struktur, mnogoobrazie fizicheskikh svoystv, vozmozhnosti sinteza novykh soedinenij)* [Perovskite crystals (hierarchy structure, a variety of physical properties, the possibility of synthesizing new compounds)]. Novosibirsk: Nauka, 1997.
4. Aleksandrov K. S., Beznosikov B. V. *Perovskity. Nastoyashee i budushee (mnogoobrazie prafaz, fazovyе prevrascheniya, vozmozhnosti sinteza novykh soedinenij)* [Perovskites. The present and the future (the variety of parent phase, phase transformations, the possibility of synthesizing new compounds)]. Novosibirsk: Nauka, 2004.
5. Smith M. B., Page K., Siegrist T., Redmond P. L., Walter E. C., Seshadri R., Brus L. E., Siegrist M. L. *J. Am. Chem. Soc.* 2008, 130, No. 22: 6955.
6. Jabarov S. G., Kozlenko D. P., Kichanov S. E., Belushkin A. V., Savenko B. N., Mextieva R. Z., Lathe C. *Phys. of the Sol. Stat.* 2011, 53, No. 11: 2300.
7. Mekhdieva R. Z., Lukin E. V., Kichanov S. E., Kozlenko D. P., Jabarov S. H., Dang T. N., Mammadov A. I., Savenko B. N. *Phys. of the Sol. Stat.* 2014, 56, No. 4: 765.
8. Tretyakov Yu. D. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal* [Soros Educational Journal] 1999, 4: 35.

9. Panich A. E., Levina T. G. *Fizika segneto elektricheskoy keramiki* [The physics of ferroelectric ceramics]. Rostov-na-Donu: RGU, 2002.
10. Okadzaki K. *Tehnologiya keramicheskikh dielektrikov* [Technology ceramic dielectrics]. Moscow: Energiya, 1976.
11. Potdar H. S., Deshpande S. B., Date S. K. *Mater. Chem. Phys.* 1999, 58: 121.
12. Xu H., Gao L. *J. Am. Ceram. Soc.* 2003, 86: 203.
13. Wang L., Liu L., Xue D., Kang H., Liu C. *J. Alloys Comp.* 2007, 440: 78.
14. Chebanova E. V., Kabirov Yu. V., Kupriyanov M. F. *Naukovedenie* 2012, 4: 1.
15. Lee M. K., Nath T. K., Eoma C. B., Smoak M. C., Tsui F. *App. Phys. Lett.* 2000, 77, No. 22: 3547.
16. Lazerevic Z., Romcevic N., Vijatovic M., Paunovic N., Romcevic M., Stojanovic B., Dohcevic-Mitrovic Z. *Acta Phys. Pol. A.* 2009, 115, No. 4: 808.
17. Tkacz-Smiech K., Kolezynski A., Ptak W. S. *Sol. Stat. Comm.* 2003, 127: 557.
18. Smolenskij G. A. *Fizika segneto elektricheskikh yavlenij* [The physics of ferroelectric phenomena]. Leningrad: Nauka, 1985.
19. Yang W., Yua S., Luo S., Sun R., Liao W.-H., Wong C.-P. *J. Alloys and Comp.* 2015, 620: 315.
20. Xiao C. J., Jin C. Q., Wang X. H. *Materials Chemistry and Physics* 2008, 111: 209.
21. Ramirez R., Lapena M. F., Gonzalo J. A. *Phys. Rev. B.* 1990, 42, No. 4: 2604.
22. Hayward S. A., Salje E. K. H. *J. of Phys.: Cond. Matt.* 2002, 14, No. 36: L599.
23. Ram S., Jana A., Kundu T. K., *J. Appl. Phys.* 2007, 102: 54.
24. Tkacz-Smiech K., Kolezynski A., Ptak W. S. *Solid State Comm.* 2003, 127: 557.
25. Gurtov V. A., Osaulenko R. N. *Fizika tverdogo tela dlya inzhenerov* [Solid State Physics for Engineers]. Moscow: Tehnosfera, 2007.
26. Gorelik S. S., Dashevskij M. Ya. *Materialovedenie poluprovodnikov i dielektrikov* [Material science of semiconductors and dielectrics]. Moscow: MISIS, 2003.
27. Brechignac C., Houdy P., Lehmani M. (Eds.). *Nanomaterials and Nanochemistry*. Berlin: Springer, 2007.
28. Vijatovic M. M., Bobic J. D., Stojanovic B. D. *Science of Sintering*. 2008, 40: 155.
29. Pradhan S., Roy G.S. *Researcher* 2013, 5, No. 3: 63.
30. Iona F., Shirane D. *Segnetoelektricheskie kristally* [Ferroelectric crystals]. Moscow: Mir, 1965.
31. Wodecka-Dus B., Czeka D. *Arch. of Met. and Mat.* 2009, 54, No. 4: 923.
32. Kuruva P., Rajaputra U. M. S., Sanyadanam S., Sarabu R. M. *Turk. J. Phys.* 2013, 37: 312.
33. Rother A., Reibold M., Lichte H., Leisegang T., Levin A. A., Paufler P., Meyer D. C., Gemming S., Chaplygin I., Seifert G., Ormeci A., Rosner H. *Phys. Rev. B.* 2006, 74: 134116.
34. Ghosez P., Gonze X., Michenaud J.-P. *Ferroelectrics* 1999, 220: 1.
35. Kwel G. H., Lawson A. C., Billinge S. J. L. *J. Phys. Chem.* 1993, 97: 2368.
36. Uludogan M., Cagin T. *Turk. J. Phys.* 2006, 30: 277.
37. Malinowski By. M., Lukaszewicz K., Asbrink S. *J. Appl. Cryst.* 1986, 19: 7.
38. Birch F. J. *J. Geophys. Res.* 1986, 91: 4949.
39. Hayward S. A., Salje E. K. H. *J. Phys.: Condens. Matter.* 2002, 14: L599.
40. Samara G. A. *Phys. Rev.* 1966, 151: 378.
41. Samara G. A. *Ferroelectrics* 1971, 2: 277.
42. Decker D. L. *Phys. Rev. B.* 1989, 39: 2432.
43. Ishidate T., Abe S., Takahashi H., Mori N. *Phys. Rev. Lett.* 1997, 78: 2397.

Рецензія/Peer review : 22.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 12.12.2015 р.

УДК 621.317

О.М. ВАСІЛЕВСЬКИЙ

Вінницький національний технічний університет

## МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ДОВІРЧОГО РІВНЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ РОЗШИРЕНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОСТІ ІОНІВ

Запропоновано методіку оцінювання довірчого рівня для розрахунку розширеної невизначеності вимірювання активності іонів на основі метрологічних ризиків виробника та споживача, що дозволяє обґрунтовано встановити інтервал навколо результату вимірювання, в межах якого ймовірно розташована більшість розподілу значень, які можуть бути приписані вимірюваній величині.

Ключові слова: довірча ймовірність, розширена невизначеність, активність іонів, метрологічні ризики, інтервал навколо результату вимірювання.

O.M. VASILEVSKYI

Vinnitsia National Technical University

## METHODOLOGY TO EVALUATE THE CONFIDENCE LEVEL FOR CALCULATION OF THE EXPANDED UNCERTAINTY OF MEASUREMENT OF IONS ACTIVITY

A assessment methodology confidence level for the calculation of the extended uncertainty of measurement of ions activity on the basis of metrological risks producer and consumer, that can reasonably set the interval around the measurement result within which most probably located the distribution of values that can be attributed to the measurand.

Keywords: confidence probability, the expanded uncertainty, ion activity, the metrological risks interval around the measurement result.

### Вступ

Рекомендація INC-1 (1980) робочої групи з упорядкування звіту щодо невизначеності, що на сьогоднішній день є фактично стандартом вираження якості вимірювань у міжнародній практиці та Рекомендація 1 (МК-1981) «Оцінка експериментальних невизначеностей» і Рекомендація 1 (МК-1986)

«Оцінка невизначеностей у роботах, проведених МКМВ», підтримують використання комбінованої невизначеності  $u_c(y)$  як параметр для кількісного вираження невизначеності результату вимірювання.

Хоча комбінована невизначеність  $u_c(y)$  може повсюдно використовуватися для вираження невизначеності результату вимірювання, проте у окремих випадках: у торгівлі, промисловості і регулювальних актах, а також коли справа стосується здоров'я і безпеки, доцільно додатково вказувати інтервальну міру невизначеності, що визначає інтервал для результату вимірювання. Існування такої вимоги було визнано робочою групою і призвело до появи додаткового п'ятого розділу Рекомендації INC-1 (1980) «Вираження експериментальних невизначеностей». Додаткова міра невизначеності, що відповідає інтервальній оцінці невизначеності, називається розширеною невизначеністю.

Тому задача оцінювання довірчого рівня для розрахунку розширеної невизначеності вимірювання при використанні конкретного засобу вимірювання є актуальною.

*Метою статті* є розробка математичного апарату для оцінювання довірчого рівня при розрахунку розширеної невизначеності вимірювання активності іонів з урахуванням метрологічних ризиків виробника (розробника) та споживача, що дасть змогу обґрунтовано встановити інтервал навколо результату вимірювання активності іонів, в межах якого ймовірно розташована більшість розподілу значень, які можуть бути приписані вимірюваній величині.

### Аналіз стану досліджень та публікацій

В літературних джерелах [1 - 5] лише частково розглядаються способи встановлення довірчого рівня для розрахунку розширеної невизначеності вимірювання. Математичний апарат, який дозволяв би обґрунтовано встановлювати довірчий рівень в концепції невизначеності вимірювань не описується. Тому доцільно запропонувати і описати методику оцінювання довірчого рівня на основі метрологічних ризиків виробника та споживача, що дозволить обґрунтовано встановлювати значення коефіцієнту охоплення  $k$  для розрахунку розширеної невизначеності вимірювання на прикладі використання розробленого засобу вимірювання активності іонів.

### Викладення основного матеріалу

Довірчий рівень для розрахунку розширеної невизначеності пропонується встановлювати на основі метрологічних ризиків виробника та споживача за формулою:

$$D = 1 - P_n = 1 - (\alpha + \beta), \quad (1)$$

де  $\alpha$  – метрологічний ризик виробника;  $\beta$  – метрологічний ризик споживача;  $P_n$  – загальне значення метрологічного ризику.

На основі розробленого засобу вимірювання (ЗВ) активності іонів [6, 7], опишемо процедуру визначення довірчого рівня.

Загальний закон розподілу похибки вимірювання активності іонів залежить від багатьох причин, таких як активність заважаючих іонів, обмежені властивості іон-селективних електродів, наявність похибки вимірювання температури, дрейф нуля, нестабільність джерела живлення тощо, серед яких важко виділити домінуючу. Це дозволяє прийняти закон розподілу центрованого значення похибки вимірювання активності іонів за нормальний, який опишемо виразом:

$$p(\Delta pX) = \frac{1}{\sigma_{\Delta pX} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\Delta pX^2}{2\sigma_{\Delta pX}^2}\right], \quad (2)$$

де  $\Delta pX$  – центроване значення похибки вимірювання активності іонів;  $\sigma_{\Delta pX}$  - середньоквадратичне відхилення (СКВ) центрованого значення активності іонів.

Сумісну двовимірну щільність довірчого рівня при вимірюванні активності іонів з урахуванням допустимого відхилення похибки вимірювання  $\varepsilon$ , що встановлюється споживачем, опишемо виразом [8]:

$$p(\Delta pX, \varepsilon) = p(\Delta pX) \cdot p(\varepsilon) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\Delta pX}\sigma_\varepsilon} \exp\left(-\frac{\Delta pX^2}{2\sigma_{\Delta pX}^2} - \frac{\varepsilon^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right). \quad (3)$$

Враховуючи вираз (3), метрологічний ризик виробника  $\alpha$  оцінимо за формулою:

$$\alpha = \frac{1}{2\pi\sigma_{\Delta pX}\sigma_\varepsilon} \int_{-\Delta}^{\Delta} \left[ \int_{-\infty}^{-\Delta-\Delta pX} \exp\left(-\frac{\Delta pX^2}{2\sigma_{\Delta pX}^2} - \frac{\varepsilon^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right) d\varepsilon + \int_{\Delta-\Delta pX}^{\infty} \exp\left(-\frac{\Delta pX^2}{2\sigma_{\Delta pX}^2} - \frac{\varepsilon^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right) d\varepsilon \right] d\Delta pX, \quad (4)$$

а метрологічний ризик споживача  $\beta$  оцінимо за формулою:

$$\beta = \frac{1}{2\pi\sigma_{\Delta pX}\sigma_\varepsilon} \left( \int_{-\infty}^{-\Delta} \int_{-\Delta-\Delta pX}^{\Delta-\Delta pX} \exp\left(-\frac{\Delta pX^2}{2\sigma_{\Delta pX}^2} - \frac{\varepsilon^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right) d\Delta pX d\varepsilon + \int_{\Delta}^{\infty} \int_{\Delta-\Delta pX}^{\Delta-\Delta pX} \exp\left(-\frac{\Delta pX^2}{2\sigma_{\Delta pX}^2} - \frac{\varepsilon^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right) d\Delta pX d\varepsilon \right). \quad (5)$$

Контрольні прирости полів допуску  $\Delta$  за нижньою та верхньою межами прийемо рівними нулю ( $\Delta=0$ ), а поле допуску значення вимірюваної величини  $\Delta pX$ , в даному випадку це активність іонів  $pX$

складових елементів гумусу, визначимо за формулою [9, 10]:

$$\Delta pX = \frac{pX_{\max}}{100} \delta_{\sigma_{\max}}, \quad (6)$$

де  $pX_{\max}$  – максимальна активність іонів складових елементів гумусу (максимальне значення для нітратного азоту складає 0,3 рХ);  $\delta_{\sigma_{\max}}$  – максимально допустима відносна похибка вимірювання, що встановлена споживачем (нормативними документами на вимірюване значення фізичної величини) – для вимірювального каналу активності іонів це значення складає 0,7% в діапазоні вимірювань від 6 до 0,3рХ.

Отже, для розрахунку метрологічних ризиків виробника та споживача поле допуску  $\Delta pX$ , розрахуємо за формулою (6), яке при підставленні відповідних числових значень дорівнює  $2,1 \cdot 10^{-3}$  рХ. СКВ активності іонів, що отримано в результаті експериментальних досліджень виробника ЗВ активності іонів не перевищує  $\sigma_{\Delta pX} \leq 0,75 \cdot 10^{-3}$  рХ в діапазоні вимірювань від 6 до 0,3 рХ [9 – 12].

Підставляючи розраховані поля допусків у формули для оцінювання метрологічних ризиків виробника (4) та споживача (5) та розв'язуючи їх за допомогою математичного пакету Maple 10.0, отримуємо такі числові значення:  $\alpha=0.0375$ ,  $\beta=0.00195$ . Загальне значення метрологічного ризику складає  $P_n = 0.0375 + 0.00195 = 0.0395$ , а довірчий рівень для розрахунку розширеної невизначеності вимірювання, відповідно до формули (1) буде дорівнювати  $D = 1 - P_n = 1 - 0.0395 = 0.9605$ . Такі значення метрологічних ризиків виробника та споживача отримані за умови коли СКВ розробленого ЗВ активності іонів є меншим за СКВ допустимого відхилення похибки (невизначеності), що встановлені споживачем (або нормативними документами), тобто при  $\mu = 0,93$ .

Характеристики зміни метрологічних ризиків виробника і споживача в залежності від параметра  $\mu = \sigma_{\epsilon} / \sigma_{\Delta pX}$ , що встановлює співвідношення між СКВ  $\sigma_{\epsilon}$ , яке встановлено виробником (розробником) ЗВ активності іонів та СКВ  $\sigma_{\Delta pX}$  допустимої похибки вимірювання активності іонів, яке встановлено споживачем (нормативними документами, в яких прописується допустимі відхилення вимірюваних величин) при  $\sigma_{\epsilon} < \sigma_{\Delta pX}$ ,  $\sigma_{\epsilon} \approx \sigma_{\Delta pX}$  і  $\sigma_{\epsilon} > \sigma_{\Delta pX}$  наведені на рис.1. Характеристика зміни загального значення метрологічного ризику, обумовленого наявністю метрологічних ризиків виробника та споживача представлена на рис. 2.

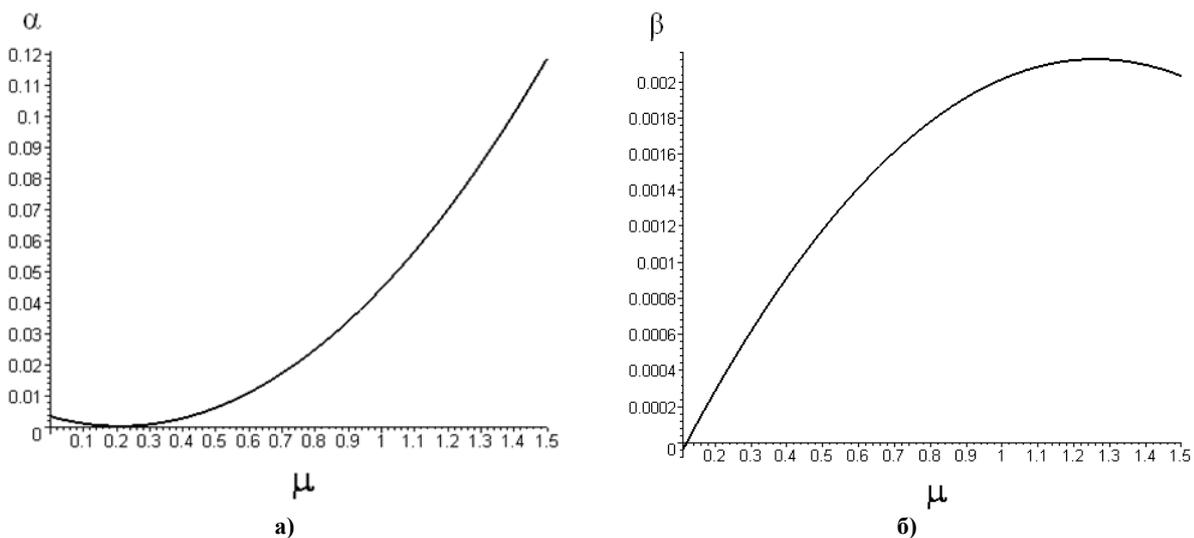


Рис. 1. Характеристики зміни метрологічних ризиків: а) – виробника; б) – споживача

Таким чином, на основі відношення значення СКВ, що експериментально встановлено виробником засобу вимірювання до значення СКВ допустимого споживачем відхилення (встановленого нормативними документами допуску) та отриманої характеристики зміни метрологічного ризику можна обґрунтовано графічним шляхом визначити значення довірчого рівня для розрахунку розширеної невизначеності вимірювання (рис. 2). Тобто, якщо параметр  $\mu$ , який дорівнює відношенню зазначених вище СКВ складає 0,93, то провівши перпендикулярну лінію від розрахованого значення параметру  $\mu=0.93$  до перетину з отриманою характеристикою зміни метрологічного ризику (штрихові лінії на рис. 2), можна визначити значення метрологічного ризику  $P_n$  на основі якого за виразом (1) розраховується довірчий рівень  $D = 1 - P_n = 1 - 0.04 = 0.96$  в межах якого ймовірно розташована більшість розподілу значень, які можуть бути приписані вимірюваній величині.

З побудованої характеристики зміни метрологічного ризику, шляхом математичного моделювання, встановлено, що при збільшенні в 1,5 рази сумарного значення СКВ, що вноситься розробленим засобом вимірювання активності іонів (СКВ виробника  $\sigma_{\epsilon}$ ) за рахунок наявності випадкових завод, неточності виготовлення іон-селективних вимірювальних перетворювачів, відхилення температури та нестабільності

джерела опорної напруги, за допустиме значення СКВ, що встановлене нормативними документами (технологічним процесом) довірчий рівень, в межах якого ймовірно розташована більшість розподілу значень вимірюваної активності іонів буде не гіршим за 88 %.

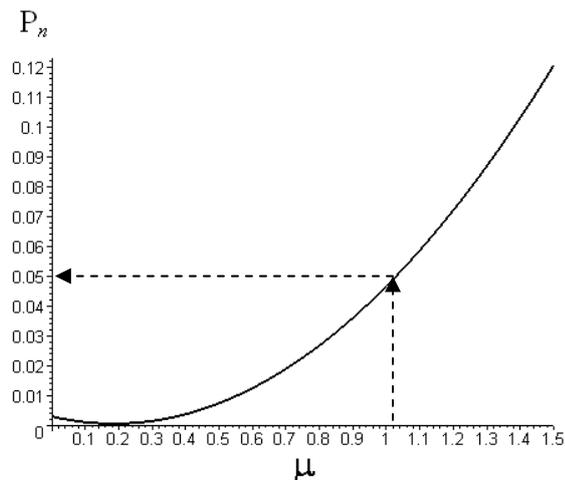


Рис. 2. Характеристика зміни метрологічного ризику в залежності від параметра  $\mu$

### Висновки

В роботі досліджено характеристики зміни метрологічних ризиків виробника та споживача на основі яких отримано загальну характеристику зміни метрологічного ризику, що виникає при вимірюванні активності іонів на основі якої можна визначати графічним способом довірчий рівень в межах якого ймовірно розташована більшість розподілу значень, що отримуються при вимірюванні активності іонів.

Для досягнення максимального значення довірчого рівня (99,9 %), необхідно щоб сумарне значення СКВ розробленого засобу вимірювання активності іонів  $\sigma_{\varepsilon}$  було як мінімум в 2 рази меншим за допустиме значення СКВ, що встановлено споживачем (нормативними документами, в яких прописується допустимі відхилення активності іонів), тобто параметр  $\mu$  має дорівнювати 0,5. Досягти таких результатів можна за рахунок зменшення відносної похибки (невизначеності) вимірювання до 0,35%. Тому подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення методу вимірювання активності іонів, підвищення точності засобу вимірювання та іон-селективних сенсорів.

### Література

1. ISO/IEC Guide 98-1:2009 «Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement». – Geneva (Switzerland): ISO. – 2009. – 32 p.
2. Васілевський О. М. Алгоритм оцінювання невизначеності у вимірюваннях при виконанні метрологічних робіт / О. М. Васілевський // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – № 3 (7). – 2006. – С. 147–151.
3. Васілевський О. М. Основи теорії невизначеності вимірювань: [підручник] / О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський. - Вінниця : ВНТУ, 2015. – 230 с. - ISBN 978-966-641-632-5.
4. IEC GUIDE 115-2007 «Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector». – Geneva (Switzerland): IEC. – 2007. – 54 p.
5. VASILEVSKYI, O. M. Calibration method to assess the accuracy of measurement devices using the theory of uncertainty. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2014, 5.04: 403.
6. Васілевський О.М. Елементи теорії побудови потенціометричних засобів вимірювального контролю активності іонів з підвищеною вірогідністю : [монографія] / О. М. Васілевський, В. М. Дідич. - Вінниця: ВНТУ. – 2013. – 176 с. – ISBN 978-966-641-505-2.
7. Дідич В. М. Потенціометричні засоби вимірювання активності іонів складових елементів гумусу в ґрунті / В. М. Дідич, О. М. Васілевський, В. О. Поджаренко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 5. – С. 5 – 10.
8. Поджаренко В. О. Оцінка вірогідності автоматизованого контролю складових елементів гумусу в ґрунті / В. О. Поджаренко, В. М. Дідич, О. М. Васілевський // Вісник національного університету „Львівська політехніка”. Серія: „Автоматика, вимірювання та керування”. – 2009. – № 639. – С. 51 – 54.
9. Васілевський О. М. Метрологічне забезпечення вимірювань активності іонів / О. М. Васілевський, В. М. Дідич // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. - № 2. – С. 54 – 58.
10. Васілевський О. М. Нормування показників надійності технічних засобів : [навчальний посібник] / О. М. Васілевський, О. Г. Ігнатенко. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 160с. – ISBN 978-966-641-535-9.

11. Васілевський О.М. Оцінка статичних метрологічних характеристик вимірювального каналу активності іонів / О. М. Васілевський, В. М. Дідич, В. О. Поджаренко // Наукові праці Вінницького національного технічного університету [Електронне наукове фахове видання]. – 2009. – № 4. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1044/99>.

12. Василевский А. Н. Неопределенность измерительного канала активности ионов при контроле гумусового состояния почв с помощью ионоселективных электродов / А. Н. Василевский, В. А. Поджаренко, В. Н. Дидич // Системы обработки информации. – Харьков. – 2008. – № 4 (71). – С. 85 – 87.

#### References

1. ISO/IEC Guide 98-1:2009 «Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement». – Geneva (Switzerland): ISO. – 2009. – 32 p.
2. Vasilevskiy O. M. Algoritm otsinyvannya nevyznachenosti u vymiryvannyakh pry vykonanni metrologichnykh robot / O. M. Vasilevskiy // Informatsiyni tehnologii ta kompyuterna inzheneriya. – № 3 (7). – 2006. – P. 147–151.
3. Vasilevskiy O. M. Osnovy teorii nevyznachenosti vymiryvan: [pidruchnyk] / O. M. Vasilevskiy, V. Y. Kucheruk, E. T. Volodarskiy. - Vinnytsya: VNTU, 2015. – 230 p. - ISBN 978-966-641-632-5.
4. IEC GUIDE 115-2007 «Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector». – Geneva (Switzerland): IEC. – 2007. – 54 p.
5. VASILEVSKYI, O. M. Calibration method to assess the accuracy of measurement devices using the theory of uncertainty. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2014, 5.04: 403.
6. Vasilevskiy O. M. Elementy teorii pobudovy potentsiometrychnykh zasobiv vymiryvalnogo kontrolyu aktivnosti ioniv z pidvyschenoy virogidnistyu : [monographiya] / O. M. Vasilevskiy, V. M. Didich. - Vinnytsya: VNTU. – 2013. – 176 p. – ISBN 978-966-641-505-2.
7. Didich V. M. Potentsiometrychni zasoby vymiryvannya aktyvnosti ioniv skladovykh elementiv gumusu v grunti / V. M. Didich, O. M. Vasilevskiy, V. O. Podzharenko // Visnyk Vinnytskogo Politechnichnogo Instytutu. – 2008. – № 5. – P. 5 – 10.
8. Podzharenko V. O. Otsinka virogidnosti avtomatyzovanogo kontrolyu skladovykh elementiv gumusu v grunti / V. O. Podzharenko, V. M. Didich, O. M. Vasilevskiy // Visnyk Natsionalnogo Universitetu "Lvivska Politechnika". Seriya: "Avtomatyka, vymiryvannya ta keruvannya". – 2009. – № 639. – P. 51 – 54.
9. Vasilevskiy O. M. Metrologichne zabezpechennya vymiryvan aktyvnosti ioniv / O. M. Vasilevskiy, V. M. Didich // Vymiryvalna ta obchyslyvalna tehnika v tehnologichnykh protsesakh. – 2014. – № 2. – P. 54 – 58.
10. Vasilevskiy O. M. Normuvannya pokaznykiv nadiynosti tekhnichnykh zasobiv : [navchalnyy posibnyk] / O. M. Vasilevskiy, O. G. Ignatenko. – Vinnytsya: VNTU, 2013.–160 p. – ISBN 978-966-641-535-9.
11. Vasilevskiy O. M. Otsinka statychnykh metrologichnykh kharakterystyk vymiryvalnogo kanalu aktyvnosti ioniv / O. M. Vasilevskiy, V. M. Didich, V. O. Podzharenko // Naukovi pratsi Vinnytskogo Natsionalnogo Technichnogo Universytetu [Elektronne naukove phakhove vydannya]. – 2009. - №4. – Rezhim dostupu do zhurnalu: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1044/99>.
12. Vasilevskiy O. M. Neopredelennost izmeritelnogo kanala aktivnosti ionov pri kontrole dumusovogo sostoyaniya pochv s pomoshchyu ionoselektivnykh elektrodov / O. M. Vasilevskiy, V. O. Podzharenko, V. M. Didich // Systemy obrobky informatsii. – Kharkiv. – 2008. – № 4 (71). – P. 85 – 87.

Рецензія/Peer review : 17.11.2015 р.

Надрукована/Printed :12.12.2015 р.

**УДК 629.78**

**Л.А. МИХЕЕНКО, М.А. ПУГИНА**

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭТАЛОНА ЯРКОСТИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СФЕРЫ С РАССЕИВАТЕЛЕМ НА ВЫХОДНОЕ ЯРКОСТНОЕ ПОЛЕ**

*В статье описаны результаты численного анализа влияния микроструктуры внутренней поверхности интегрирующей сферы на характеристики формируемого эталоном выходного яркостного поля. Проанализировано влияние параметров источника излучения на метрологические характеристики эталона яркости.*

*Ключевые слова: оптическая радиометрия, оптическая метрология, эталон яркости.*

L. A. MIKHEYENKO, M. O. PUHINA

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

## **ANALYSIS OF INFLUENCE OF STRUCTURAL ELEMENTS OF STANDARD OF BRIGHTNESS ON BASIS OF INTEGRATING SPHERE WITH DIFFUSER ON THE OUTPUT BRIGHTNESS FIELD**

*Abstract – The aim of work is the detailed analysis of homogeneity of the output brightness field of standard of brightness on the basis of integrating sphere with a diffuser, depending on his basic structural elements.*

*In the article the numerical analysis of influence of microstructure of internal surface of integrating sphere is described on descriptions of the output brightness field formed by a standard. Influence of parameters of radiant on metrology descriptions of standard of brightness is analyzed. Influence of elements of standard of brightness is analyzed on the output brightness field.*

*It is shown that in all cases position of element of microstructure is the most substantial factor of influence on distribution of brightness of output aperture. Change of other parameters of elements influence on an unevenness on determination of brightness is much less.*

*Keywords: optical radiometry, optical metrology, the standard brightness.*

### **Введение**

Рабочие эталоны яркости (ЭЯ) на основе интегрирующей сферы (ИС) с рассеивателем имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными излучателями – прежде всего значительную апертуру и

высокую яркость [1, 2]. Однако достижение минимальной неоднородности выходного яркостного поля является весьма сложной задачей. В [2] был предложен численный метод анализа выходного яркостного поля, основанного на расчете прохождения единичного луча в ИС, позволяющего оценить его неоднородность.

Целью настоящей работы является детальный анализ однородности выходного яркостного поля эталона яркости на основе ИС с рассеивателем, в зависимости от его основных конструктивных элементов.

**Конструктивные элементы эталона яркости**

Конструктивная схема эталона яркости представлена на рис. 1.

Основными элементами эталона, являются источники излучения, экраны и рассеивающее покрытие, которое в общем случае может содержать различные микронарушения поверхности. На рис. 2 предоставлены модели этих микронарушений, позволяющие практически полностью описать фотометрические характеристики эталона.

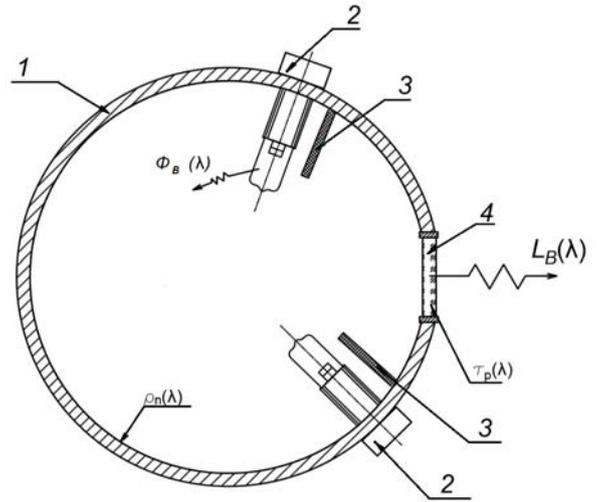


Рис. 1. Конструктивная схема эталона яркости: 1 – интегрирующая сфера; 2 – источник излучения; 3 – экран; 4 – рассеиватель.

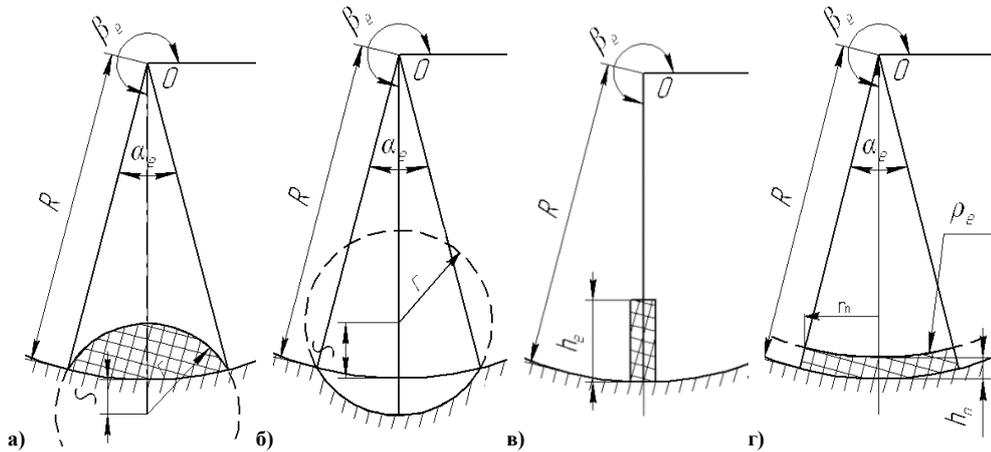


Рис. 2. Основные типы элементов ИС и ЭЯ: а) «горб»; б) «яма»; в) «заграждение»; г) «пятно».

Рассмотрим влияние каждого из указанных элементов на формирование выходного яркостного поля, воспользовавшись численным методом анализа описаного в [2]. Для большей определенности примем следующие параметры эталона:

$$R_{ит} = 75 \text{ мм}; \quad R_{вых} = 15 \text{ мм}; \quad \rho = 0,994 .$$

**Влияние элементов эталона яркости на выходное яркостное поле**

*Элемент типа «горб».*

Исходные данные для расчёта приведены в табл. 1, а полученные зависимости - на рис. 3.

При этом отметим, что графики распределения выходной яркости апертуры представлены в 4-х видах: точные значения в точках, сглаженное распределение, логарифмическая аппроксимация и линейная аппроксимация.

Таблица 1

**Расчетные параметры элемента типа «горб»**

Параметр	Начальная величина	Диапазон изменений параметра	Шаг итерации параметра
$\beta_e$	270°	45° - 315°	30°
$r$	15 мм	6 - 33 мм	3 мм
$S$	5 мм	1 - 10 мм	1 мм

Из графиков на рис. 3 можно сделать следующие выводы:

1. Максимальная неравномерность яркости выходной апертуры соответствует случаю, когда элемент находится напротив источника излучения, и первоначальное излучение попадает непосредственно

на поверхность элемента. По мере удаления элемента из этой зоны неравномерность значительно уменьшается.

2. Зависимость неравномерности яркости выходного апертуры, в зависимости от радиуса элемента имеет достаточно сложный характер, в целом неравномерность яркости уменьшается пропорционально увеличению радиуса элемента. Это объясняется тем, что при увеличении радиуса форма поверхности все больше приближается к форме поверхности ИС, т.е. она выравнивается.

3. Зависимость неравномерности яркости выходной апертуры от смещения центра кривизны элемента, имеет скачкообразный характер. Вначале величина неравномерности увеличивается с ростом отклонения, однако после достижения значения равно половине радиуса кривизны резко уменьшается. Такая зависимость объясняется тем, что величина отклонения начинает компенсировать неравномерность, вызванную большим радиусом кривизны элемента.

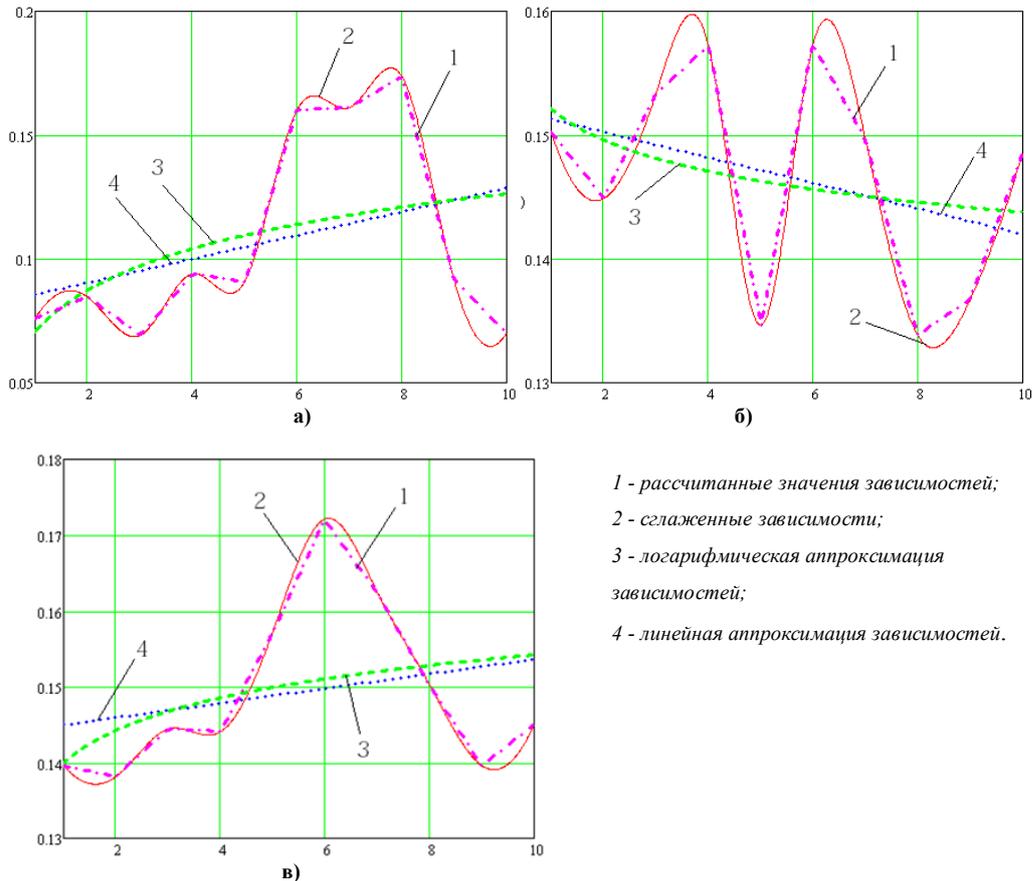


Рис. 3. Коэффициент неравномерности выходной яркости апертуры эталона яркости при неравномерности тип «горб», в зависимости от: а) положения элемента; б) радиуса элемента; в) смещения центра кривизны элемента.

Элемент типа «яма».

Исходные данные для расчёта представлены в табл. 2, полученные результаты - на рис. 4.

Таблица 2

Расчетные параметры элемента типа «яма»

Параметр	Начальная величина	Диапазон изменений параметра	Шаг итерации параметра
$\beta_e$	270°	45°- 315°	30°
$r$	15 мм	6 - 33 мм	3 мм
$S$	5 мм	1 - 10 мм	1 мм

Из графиков на рис. 4 можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициент неравномерности яркости выходного апертуры имеет максимальное значение в случае, когда элемент находится напротив источника излучения. Однако величина неравномерности практически во всех точках имеет большое значение, что вызвано тем, что не все лучи, попадающие в середину элемента выходят из него, т.е. уменьшается общая яркость некоторых зон выходной апертуры.

2. Коэффициент неравномерности яркости выходного апертуры, в зависимости от радиуса элемента очень медленно растет во всем диапазоне изменений радиуса.

3. При постоянном радиусе и переменной величине отклонения центра кривизны элемента происходит увеличение величины коэффициента неравномерности яркости.

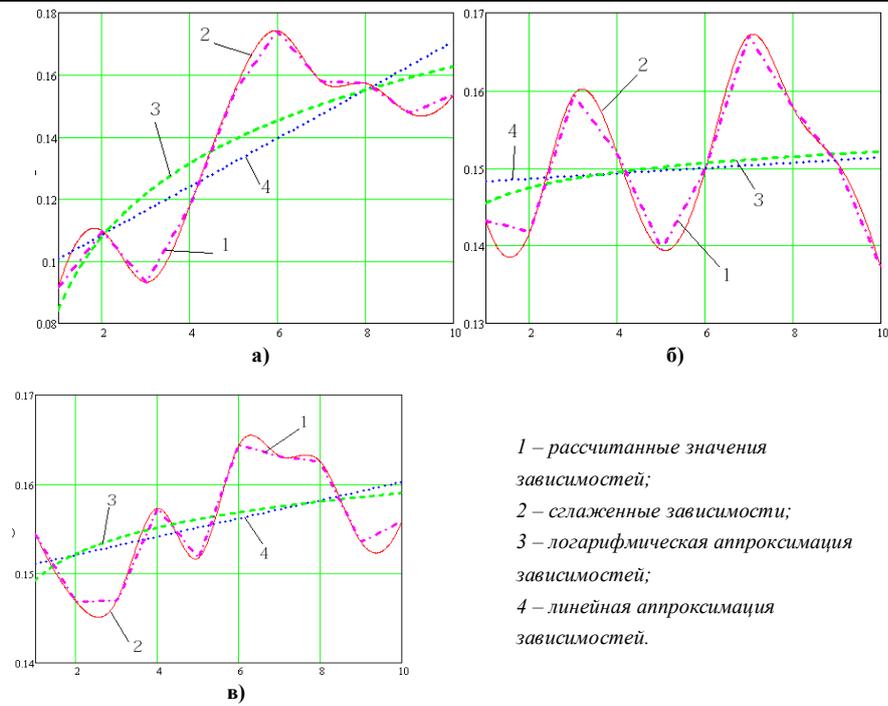


Рис. 4. Коэффициент неравномерности яркости выходного апертурного ДИ при неравномерности типа «яма», в зависимости от: а) положения элемента; б) радиуса элемента; в) смещения центра кривизны элемента.

Элемент типа «заграждение».

Для упрощения описания и математических выкладок, будем считать, что поверхность элемента имеет идеальную плоскую поверхность.

Величины, которые были выбраны для расчета приведены в табл. 3, а полученные распределения яркости выходной апертурной представлены на рис. 5, по оси абсцисс как и раньше отложен шаг итерации параметра.

Таблица 3.

Расчетные параметры элемента типа «заграждение»

Параметр	Начальная величина	Диапазон изменений параметра	Шаг итерации параметра
$\beta_e$	270°	45° - 315°	30°
$h$	15 мм	6 - 33 мм	3 мм

Из графиков рис. 5 можно сделать следующие выводы:

1. При удалении элемента от первоначального источника - величина неравномерности яркости выходной апертурной вначале снижается, а при приближении к выходной апертуре снова начинает расти. Такая зависимость вызвана тем, что данный элемент, вносит наибольшие отклонения луча относительно любой точки своей поверхности. При размещении элемента близко к первоначальному источнику или выходной апертуре, его угловой размер имеет наибольшие размеры, при удалении - наоборот размеры уменьшаются, и тем самым уменьшается вероятность отклонения луча его поверхностью.

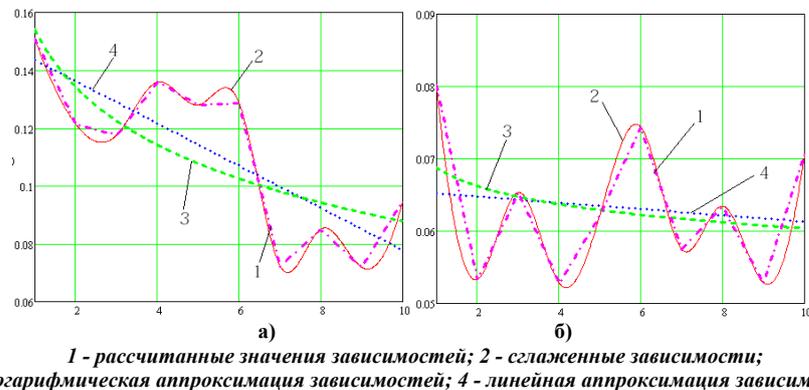
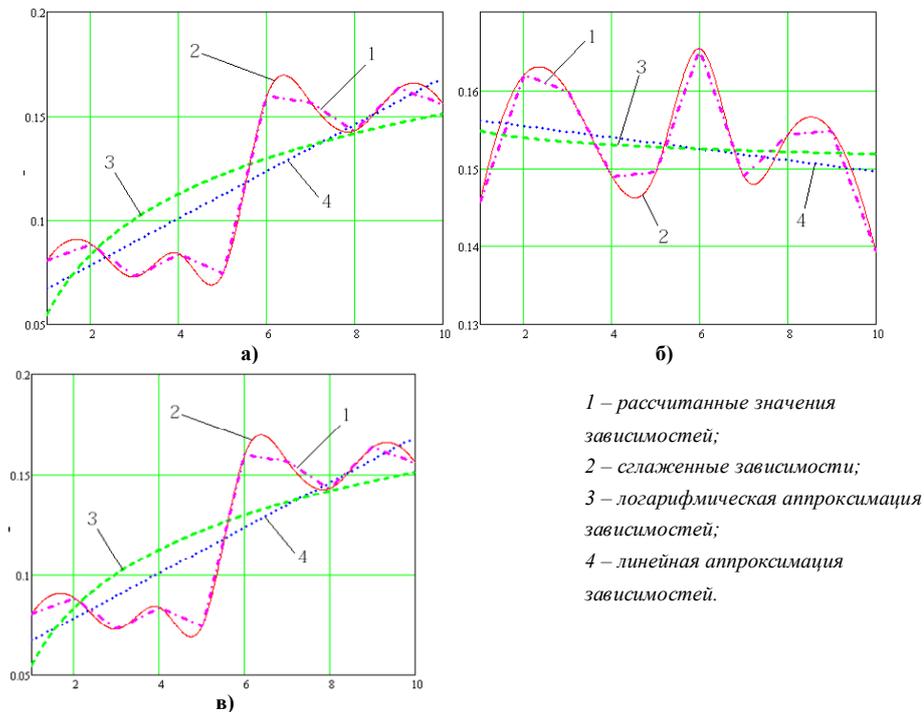


Рис. 5. Коэффициент неравномерности яркости выходного апертурного ЭА при неравномерности типа «заграждение», в зависимости от: а) положение элемента; б) высоты элемента.

2. Изменение величины элемента вносит небольшие отклонения в распределение неравномерности яркости. Однако такая зависимость характерна для случая, когда элемент находится почти напротив первоначального источника, и угловой размер элемента имеет достаточно малые размеры.

*Элемент типа «пятно».*

Величины, которые были выбраны для расчета приведены в табл. 4, коэффициент отражения поверхности элемента выбран равным 0,5. Полученные распределения представлены на рис. 6. По оси абсцисс отложен шаг итерации параметра.



**Рис. 6. Коэффициент неравномерности яркости выходной апертуры ЭЯ при неравномерности тип «пятно», в зависимости от: а) положения элемента; б) высоты элемента; в) радиуса элемента.**

Из графиков рис.6 можно сделать следующие выводы:

1. Как и в предыдущих случаях, при приближении элемента к выходной апертуры неравномерность повышается, так как все большее количество лучей отклоняются в сторону выходной апертуры. Однако в случае приближения элемента к первоначальному источнику излучения, повышение коэффициента неравномерности не так выражено, так как на элемент попадает только отраженное от поверхности сферы излучение, а не излучение от первоначального источника.

2. При увеличении высоты и радиуса элемента, коэффициент неравномерности яркости выходной апертуры пропорционально уменьшается. То есть можно сказать, что при увеличении площади пятна происходит пропорциональное уменьшение неравномерности яркости. Это объясняется тем, что первоначальное излучение источника непосредственно попадает на поверхность элемента, и большее количество лучей получает начальное ослабление (50%) и вносит меньшее влияние на суммарное распределение яркости в выходной апертуре. Т.е. выходное распределение несколько сглаживается за счет ослабления интегрального выходного потока.

Таблица 4

**Расчетные параметры элемента типа «пятно»**

Параметр	Начальная величина	Диапазон изменений параметра	Шаг итерации параметра
$\beta_e$	270°	45°- 315°	30°
$h_n$	5 мм	1 - 11 мм	1 мм
$r_n$	15 мм	6 - 33 мм	3 мм

**Влияние параметров и места размещения источника излучения на выходное яркостное поле эталона**

При разработке математической модели источника излучения использовались следующие основные элементы, образующего его форму (рис. 7). Основу элемента составляет неровность типа «горб», который ограничен с обеих сторон элементами типа «ограждение», а вся поверхность источника излучения имеет переменный коэффициент отражения, как в случае элемента типа «пятно». Разработанная модель достаточно точно описывает основные типы источников излучения, применяемых в эталонах яркости – галогенные лампы и светоизлучающие диоды.

Математические выкладки прохождения лучей по поверхностям тех или иных элементов были рассмотрены в [2], однако неопределенным остается вопрос нахождения предельных углов попадания луча на поверхность элемента. Из-за различий в выражениях для определения положения луча на поверхности ИС, после их отражения от различных частей элемента, разделим предельный угол на 3 зоны: зона левого «ограждения», центральная зона «горба», зона правого «ограждения».

Для «ограждений» предельные углы не изменятся, и будут иметь вид:

$$\theta_n = \frac{180 - \beta_e + \beta}{2}, \tag{1}$$

$$\theta_{o1} = \arcsin\left(\frac{(R - h) \cdot \sin(\beta_e - \beta)}{\sqrt{R^2 + (R - h)^2 - 2 \cdot R \cdot (R - h) \cdot \cos(\beta_e - \beta)}}\right) \tag{2}$$

где  $\theta_n$  - предельный угол до точки пересечения ИС с элементом;

$\theta_{o1}$  - предельный угол касательной к вершине элемента;

$R$  - радиус ЭЯ;

$\beta_e$  - угол, определяющий положение элемента;

$\beta$  - угол, определяющий предварительное размещение луча в координатах ДИ;

$h$  - высота элемента.

Для элемента «горб» первым углом будет описанный выше предельный угол, касательной к вершине элемента «ограждение», при этом выбор необходимой, левой или правой стенки «ограждения», ведется из соображений определения ближайшего к лучу элемента, а вторым – угол, касательный к сфере элемента, который определяется из выражения:

$$\theta_{o2} = \arcsin\left(\frac{(R + s) \cdot \sin(\beta_e - \beta)}{R^2 + (R + s)^2 - 2 \cdot R \cdot (R + s) \cdot \cos(\beta_e - \beta)}\right) - \arcsin\left(\frac{r}{R^2 + (R + s)^2 - 2 \cdot R \cdot (R + s) \cdot \cos(\beta_e - \beta)}\right) \tag{3}$$

где  $s$  – смещение центра кривизны элемента относительно поверхности сферы.

Таким образом, используя зависимости, полученные в предыдущих разделах, можно смоделировать и исследовать влияние на выходное яркостное поле практически любого источника излучения со следующими параметрами:

$\beta_e$  - положение элемента;

$r$  - радиус линзы элемента;

$h$  - высота элемента;

$r_e$  - радиус основания элемента.

В качестве исходных параметров принято:

- радиус сферы  $R = 250\text{мм}$  ;
- диаметр выходной апертуры  $D_B = 100\text{мм}$  ;
- коэффициент отражения поверхности ИС  $\rho = 0.99$  ;
- порядок косинусности первоначального источника  $m = 3$  ;
- уровень излучения первоначального источника  $I = 0.5$  ;

- количество зон на графике распределения яркости в выходной апертуре 20;

- количество расчетных единичных лучей  $n = 100$  .

По рассмотренной выше методике, рассчитывалось распределение яркости в выходной апертуре эталона яркости при изменении перечисленных параметров. При этом на каждом этапе анализа один из параметров элемента, был переменным, а другим присваивались средние значения. Изменение параметров элемента происходило в диапазоне кратности  $N = 1...10$ , где каждая точка распределения соответствует значению  $k_N = k_{N-1} + \Delta k$  .

Полученные распределения яркости представлены на рис. 8, по оси абсцисс отложено шаг итерации параметра. Величины, которые были выбраны для расчета приведены в табл. 5.

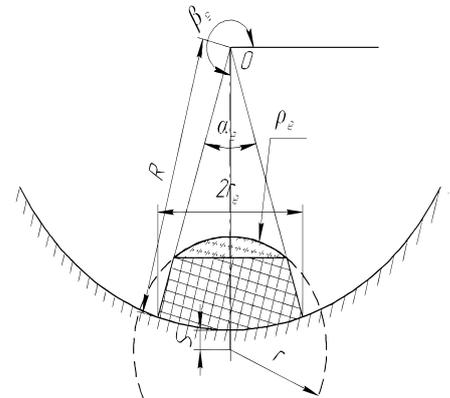
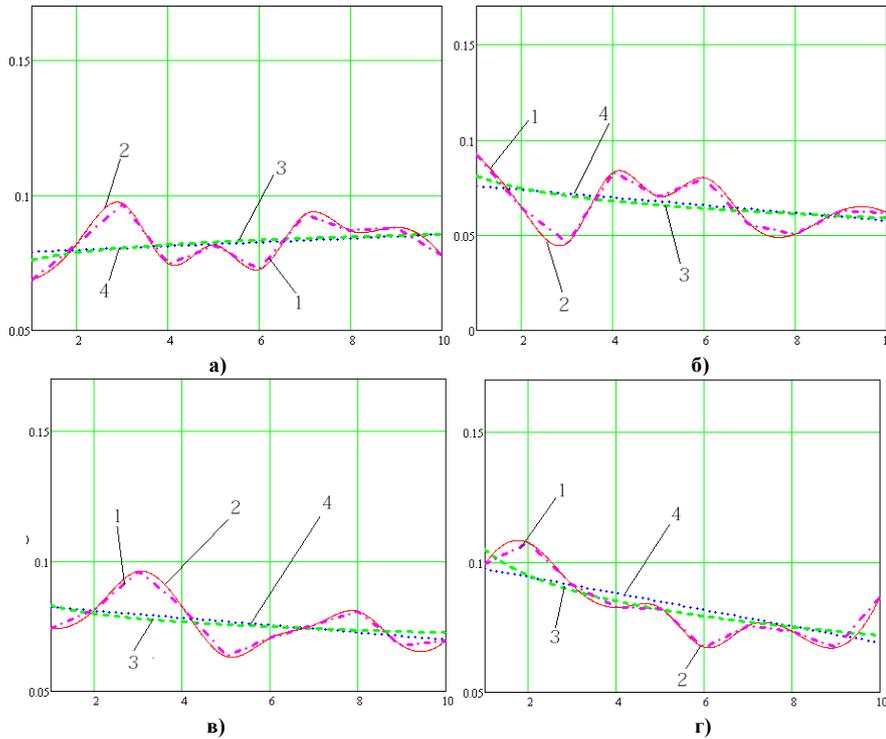


Рис. 7. Модель источника излучения

Таблица 5

**Расчетные параметры элемента типа «горб»**

Параметр	Начальная величина	Диапазон изменений параметра	Шаг итерации параметра
$\beta_e$	90°	45°-180°	13,5°
$r$	15мм	6 - 33 мм	3 мм
$h$	5мм	4 - 13 мм	1 мм
$r_e$	5мм	4 - 13 мм	1 мм



1 – рассчитанные значения зависимостей; 2 – сглаженные зависимости;  
3 – логарифмическая аппроксимация зависимостей; 4 – линейная аппроксимация зависимостей.

Рис. 8. Коэффициент неравномерности яркости выходной апертуры ЭЯ при неравномерности тип "источник излучения", в зависимости от: а) высоты элемента; б) положения элемента; в) радиуса кривизны головки элемента; г) радиуса основания элемента

Из графиков рис. 8 можно сделать следующие выводы:

1. Изменения параметров элемента не столь существенны, как в предыдущих случаях. Это объясняется тем, что лучи, исходящие из элемента, не попадают непосредственно на микродефекты, а равномерно заполняют поверхность ИС. Только при последующих отражениях излучение попадает на элемент, однако из-за потери энергии и ее перераспределения их влияние значительно уменьшается.
2. Положение элемента почти не изменяет картины распределения яркости, хотя, как и предполагалось, повышается её неравномерность при удалении от выходной апертуры эталона яркости.
3. Как и в случае с элементом «горб» - при увеличении кривизны элемента неравномерность яркости несколько уменьшается.
4. Увеличение высоты элемента несколько ухудшает распределение яркости в выходной апертуре, однако это влияние незначительно. Это объясняется тем, что высота элемента влияет только на размеры «ограждений», а вероятность попадания на них лучей - значительно меньше, чем попадание на «горб».
5. При увеличении радиуса элемента значительно уменьшается неравномерность яркости выходной апертуры эталона яркости. При увеличении площади элемента - увеличивается площадь «горба» и уменьшается площадь «ограждений», т.е. на распределение яркости больше влияет именно первая неравномерность, обладающая из-за своей круглой формы интегрирующими свойствами.

### Выводы

Выполнен численный анализ влияния микроструктуры внутренней поверхности интегрирующей сферы на характеристики формируемого эталоном выходного яркостного поля.

Показано, что во всех случаях положение элемента микроструктуры является наиболее существенным фактором влияния на распределение яркости выходной апертуры. Изменение других параметров элементов влияют на неравномерности на определение яркости намного меньше.

Проанализировано влияние параметров источника излучения на метрологические характеристики эталона яркости. Установлено, что размеры источника излучения меньше влияют на распределение яркости в выходной апертуре, чем положение источника.

Показано, что неравномерность яркости в выходной апертуре эталона может быть снижена до 0,5% при использовании традиционных источников излучения (галогенных ламп и светоизлучающих диодов) и покрытий на основе сернокислого бария и политетрафторэтилена.

В дальнейшем планируется проведение экспериментальных исследований эталона яркости на основе интегрирующей сферы с рассеивателем.

Работа будет интересна специалистам в области оптической метрологии и радиометрии.

## Литература

1. Міхеєнко Л. А., Пугіна М. О. Робочий еталон яскравості на базі інтегровальної сфери з розсіювачем // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – №4 – с. 9-15
2. Міхеєнко Л. А., Пугіна М. О. Численный метод анализа выходного яркостного поля эталона яркости на основе интегрирующей сферы // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – №4. – С. 59-64

## References

1. Mikheyenko L. A., Puhina M. O. Robochij etolon yaskravosti na bazi integrual'noi sfery z rozsiuvachem // Visnyk Vinnyc'kogo politexnichnogo instytutu. -2015. – №4 – s. 9-15
2. Mikheyenko L. A., Puhina M. O. Chislenyj metod analiza vy'ходного yarkostного polya e'talona yarkosti na osnove integriruyushhej sfery. Khmelnytskyi. Measuring and Computing Devices in Technological Processes. 2015. Issue 4. P. 59-64

Рецензія/Peer review : 17.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 12.12.2015 р.

УДК 629.78

Л.А. МИХЕЕНКО, М.А. ПУГИНА

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"

## ЧИСЛЕННИЙ МЕТОД АНАЛИЗА ВЫХОДНОГО ЯРКОСТНОГО ПОЛЯ ЭТАЛОНА ЯРКОСТИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СФЕРЫ

*В статье описан метод численного анализа влияния конструктивных элементов эталона яркости на основе интегрирующей сферы с рассеивателем на неоднородность выходного яркостного поля. Показана эффективность использования численного метода анализа выходного яркостного поля излучателя на основе интегрирующей сферы.*

*Ключевые слова: оптическая радиометрия, оптическая метрология, эталон яркости.*

L.A. MIKHEYENKO, M.O. PUHINA

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

### NUMERAL METHOD OF ANALYSIS OF THE OUTPUT BRIGHTNESS FIELD OF STANDARD OF BRIGHTNESS ON BASIS OF INTEGRATING SPHERE

*Abstract - Development of numeral method of analysis of heterogeneity of the output brightness field of standard of brightness on the basis of integrating sphere with a diffuser.*

*The basic structural elements of standard of brightness and their mathematical models are considered. The method of numerical analysis of influence of structural elements of standard of brightness is worked out on heterogeneity of the output brightness field. Mathematical models are offered describing passing of rays into an integrating sphere at presence of in her basic structural elements - radiant's, screen, diffuser.*

*Efficiency of the use of numeral method of analysis of the output brightness field of emitter is shown on the basis of integrating sphere.*

*Keywords: optical radiometry, optical metrology, the standard brightness.*

#### Введение

Наиболее часто при радиометрической калибровке протяженных излучателей используются энергетическая яркость (ЭЯ) и спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ), поэтому разработка эталонных излучателей, воспроизводящих эти величины, является важной и актуальной задачей [1].

В настоящее время для хранения и передачи единиц ЭЯ и СПЭЯ используются, в основном, модели абсолютно черных тел (государственные эталоны) и светоизмерительные ленточные лампы (рабочие эталоны и образцовые средства измерений) [1]. Наряду с известными достоинствами таких излучателей, они имеют и серьезные недостатки – высокую стоимость (в первую очередь моделей черных тел), неравномерность распределения яркости по телу накала, изменение этого распределения в процессе эксплуатации, малую величину рабочей зоны (в пределах нескольких миллиметров), ограниченный срок службы (в основном ленточных ламп). Кроме того, модели черных тел и ленточные лампы в Украине не производятся, а парк находящихся в эксплуатации эталонных излучателей значительно уменьшается и морально устарел. Замена ленточных ламп галогенными [2] решает указанные выше проблемы только частично из-за дискретной структуры тела накала, образованного отдельными витками спирали и значительной неоднородности формируемого яркостного поля, имеющего к тому же, малые размеры.

В [3] был предложен эталон яркости на основе интегрирующей сферы (ИС) с рассеивателем, который обеспечивает высокий уровень яркости в пределах значительной апертуры. Основной проблемой таких эталонов является получение высокой однородности формируемого выходного яркостного поля, чему мешают микроэлементы (неоднородности) поверхности интегрирующей сферы, источники излучения с арматурой и экраны, устанавливаемые внутри нее, а также ряд других факторов.

#### Цель работы

Разработка численного метода анализа неоднородности выходного яркостного поля эталона яркости

на основе интегрирующей сферы с рассеивателем, устанавливаемым в ее выходной апертуре.

**Алгоритм численного метода анализа выходного яркостного поля**

Конструктивная схема эталона яркости показана на рис. 2. Он состоит из ИС, в выходной апертуре которой расположен рассеиватель из матового или молочного стекла. Для предотвращения прямого попадания лучей от источников излучения в выходную апертуру используются специальные рассеивающие экраны.

При разработке численного метода анализа выходного яркостного поля эталона ограничимся случаем, когда поверхность ИС имеет идеальную сферическую форму и рассмотрим ее двумерное представление в полярной системе координат (рис. 2). При этом основными параметрами будут полярный радиус  $\rho$  и полярный угол  $\phi$  ( $0 \leq \phi \leq \pi$ ). Выходная апертура ( $D_B$ ) будет определяться центральным углом  $2\alpha$  ( $\alpha = \arcsin(\frac{D_B}{D_{сф}}$ )), а положение точечного источника излучения полярным углом  $\beta$ . Будем также считать, что точечный источник находится на внутренней поверхности ИС, а его пространственное излучения описывается индикатрисой  $I(\Theta)$ . Излучение происходит в рамках эффективного угла  $\Theta_{эфф}$ , который определяется по уровню 0.5 или 0.9.

Интегральную мощность источника излучения будет составлять совокупность его единичных лучей. Рассмотрим единичный луч от источника, который попадая в ИС испытывает многократное отражение от ее поверхности (точки M, N..) и оставляет ИС в пределах выходной апертуры (точка  $E_i$ ). Вся совокупность единичных лучей в плоскости выходной апертуры формирует выходное яркостное поле  $L_{x,y} = f(\Theta, \Theta_{эфф}, \beta, \rho)$  где  $\rho$  – коэффициент отражения внутренней поверхности ИС, а соответствующая совокупность углов на выходе – индикатриса излучения эталона яркости.

Задавая в рассматриваемой системе координат параметры различных конструктивных элементов эталона яркости и их погрешности, будем рассматривать прохождение единичных лучей в ИС при их взаимодействии с указанными элементами. После этого будем исследовать совокупность всех лучей, образующих выходное яркостное поле эталона яркости и его индикатрису излучения, с учетом погрешностей ИС и элементов конструкции источников излучения.

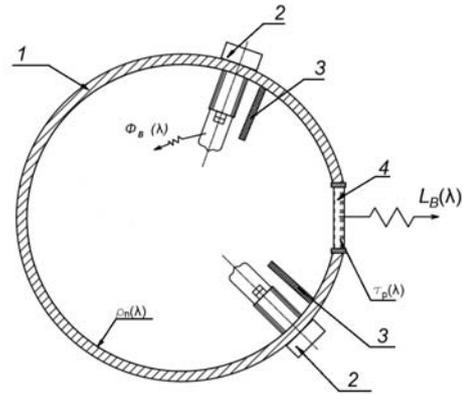


Рис. 1. Конструктивная схема эталона яркости: 1 – интегрирующая сфера; 2 – источник излучения; 3 – экран; 4 – рассеиватель.

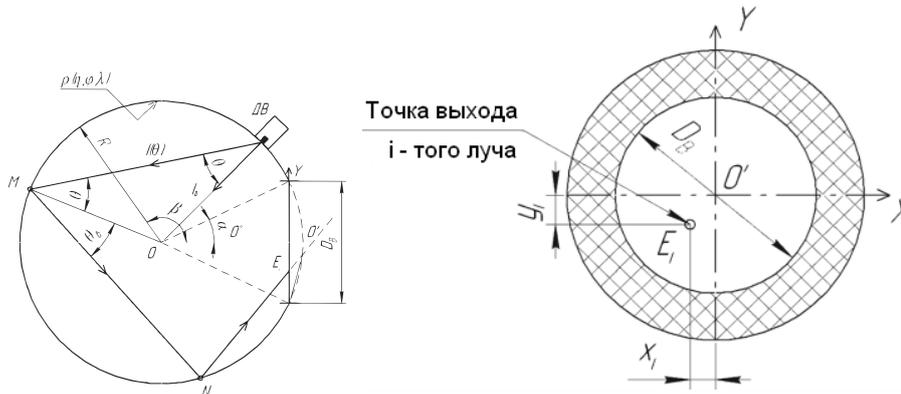


Рис. 2. Прохождение единичного луча в ИС и формирования выходного яркостного поля

**Конструктивные элементы эталона яркости и их математические модели**

Большинство конструктивных элементов эталона яркости, которые существенно влияют на параметры формируемого яркостного поля, можно представить следующими моделями, которые условно названы «яма», «горб», «ограждение» и «пятно» (рис. 3 а, б, в, г), а также их комбинациями. Например, модель источника излучения состоит из горба, пятна и двух ограждений (рис. 4), рассеиватель можно представить в виде "пятна", а экраны в виде "ограждений". Рассмотрим методику моделирования этих элементов в выбранной системе координат, воспользовавшись результатами, полученными в [4]. Как и ранее, будем считать, что на поверхностях элементов происходит идеальное диффузное отражение, а рассеиватель можно представить в виде пятна с коэффициентом отражения  $\rho$ .

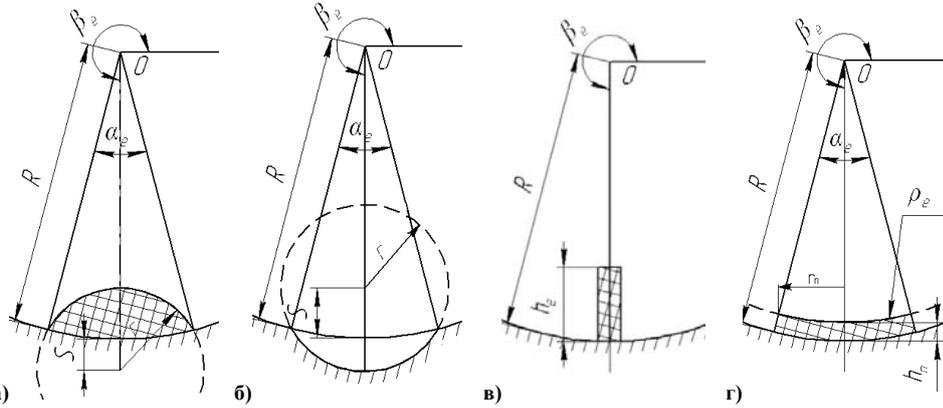


Рис. 3. Основные типы элементов ИС и эталона яркости: а) «горб»; б) «яма»; в) «заграждение»; г) «пятно».

**Элемент типа «горб».** Элементом «горб» будем считать локальную неровность поверхности сферы, в виде выпуклости в некотором ее месте с рядом определенных параметров. Для упрощения описания и математических выкладок, будем также считать, что поверхность элемента имеет идеальную круглую форму.

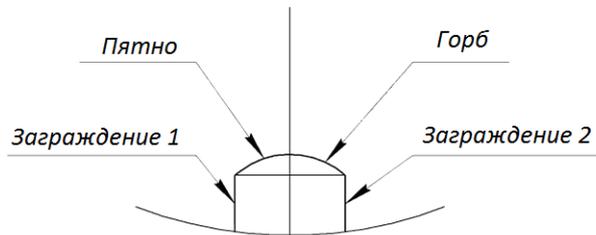


Рис. 4. Модель источника излучения, полученная путем комбинирования простых элементов.

$$\Theta_1 = \frac{\angle EKO + \Theta - \eta - \Theta_{ai}}{2} = 0,5 \arcsin \left( \frac{\sqrt{(R-r \cdot \cos(-\eta + \beta_1 - \beta_e + \Theta) + s)^2 - (r \cdot \sin(-\eta + \beta_1 - \beta_e + \Theta))^2}}{R} \cdot \sin(\angle OEK) \right) + \frac{\Theta}{2} - \frac{\eta}{2} - \frac{\Theta_{ai}}{2} \quad (1)$$

Отметим, что использовании численного метода расчетов хода лучей в ИС необходимо учитывать ряд особенностей, в основном связанных с тем, что вычисление тригонометрических функций дают погрешности, которые могут привести к комплексному виду конечного результата. Также следует добавить, что вид некоторых вышеописанных формул изменяется, а именно меняется знак при некоторых углах, в случае, когда точечный источник находится в пределах между двумя касательными от центра элемента к ИС.

**Элемент типа «яма»** Элементом «яма» будем считать локальную неровность поверхности сферы, в виде впадины в некотором ее месте с рядом определенных параметров. Для упрощения описания и математических выкладок, будем считать, что поверхность элемента имеет идеальную круглую поверхность.

Для описания этого элемента, используются параметры  $r, s, \beta_e, \alpha_e$  (рис. 5). Расчет хода лучей в ИС при наличии этого элемента, в целом аналогично рассмотренному выше случае, но имеет ряд отличий. В частности:

- не нужно находить угол  $\theta_\delta$ , но необходимо определить оба угла  $\theta_n$ ;
- в случае когда луч отражается от элемента и попадает на поверхность ДИ изменяется только вид конечного выражения, которое принимает вид:

$$\theta_1 = -\frac{\angle EKO + \theta + \eta + \eta_1}{2}, \quad (2)$$

В случае, когда луч попал на элемент (рис. 5), существует необходимость в определении величины углов  $\theta_{1n}$ , при которых луч оставит поверхность элемента (возможны также случаи, когда при отражении луч снова попадет на элемент). Для этого воспользуемся рядом преобразований:

$$\alpha_{1c} = 180 - 2 \cdot \arccos \left( \frac{r^2 + (R+s)^2 - R^2}{2 \cdot r \cdot (R+s)} \right) \quad (3)$$

из треугольника  $OEO_1$  и теоремы синусов:



$$\alpha_e = \arcsin\left(\frac{r_n}{R - h_e}\right), \quad (10)$$

Профиль элемента данного типа, в первом приближении, будем аппроксимировать сферической поверхностью, радиусом меньше размера ИС на  $r_n$  с центром, совпадающим с ИС. Пользуясь предложенной методикой, найдем углы отражения, при которых луч, исходящий из любой точки ИС, может попасть на поверхность этого элемента. Эти углы находятся из выражения для нахождения точки пересечения ИС с элементом, с тем уточнением, что в данном случае необходимо находить обе точки пересечения (рис. 7):

$$\theta_n = \frac{180 - \angle AOB}{2} = \frac{360 - 2\beta_e + 2\beta + \alpha_e}{4}, \quad (11)$$

где  $\angle AOB = \angle AOB_1 = -\angle AOB_2$ .

Следующим шагом моделирования является нахождение центрального угла (положение) луча после его отражения от поверхности элемента. Из рис. 6 видно, что: из треугольника  $OAE$  и теоремы синусов:

$$\angle OEA = \arcsin\left(\frac{OA \cdot \sin(\angle OAE)}{OE}\right), \quad (12)$$

где  $OA = R, OE = R - h_e, \angle OAE = \theta$ ;

а из треугольника  $EOG$  и теоремы синусов:

$$\angle EGO = \arcsin\left(\frac{OE \cdot \sin(\angle OEG)}{OG}\right) \quad (13)$$

где  $OG = R, \angle OEG = \theta_{ai}$ .

Путем последовательных подстановок рассчитанных выше углов, а также расчета случае с обратным ходом луча, получим, что величина искомого угла будет находиться как:

$$\beta_i = \beta_{i-1} + \Theta_{ai} + \Theta + \angle EGO + \angle OEA = \beta_{i-1} + \Theta_{ai} + \Theta - \arcsin\left(\frac{(R - h_e) \sin(\Theta)}{R}\right) + \arcsin\left(\frac{R \sin(\Theta)}{(R - h_e)}\right). \quad (14)$$

Главной особенностью элемента «пятно» является то, что при попадании на его поверхность, луч получает дополнительные энергетические потери из-за различия его показателя отражения от показателя отражения ИС. Например, если ранее принималось, что лучи испытывают диффузное отражение от поверхности с некоторым коэффициентом  $\rho(\Theta)$ , то при отражении на элементе «пятно», коэффициент отражения  $\rho_e(\Theta)$  может описываться как некоторым законом, так и случайной величиной.

### Выводы

Разработан метод численного анализа влияния конструктивных элементов эталона яркости на основе интегрирующей сферы с рассеивателем на неоднородность выходного яркостного поля.

Предложены математические модели описывающие прохождение лучей внутри интегрирующей сферы при наличии в ней основных конструктивных элементов – источников излучения, экрана, рассеивателя.

Показана эффективность использования численного метода анализа выходного яркостного поля излучателя на основе интегрирующей сферы.

Во второй части работы будет проведен анализ формирования яркости поля, эталона яркости с учетом параметров его основных конструктивных элементов.

Результаты работы будут интересны специалистам в области прецизионной радиометрии и оптической метрологии.

### Литература

1. Котюк А. Ф. Единая система государственных эталонов энергетической фотометрии

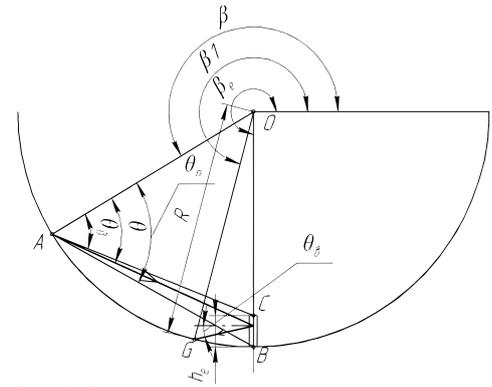


Рис. 6. Основные расчетные параметры моделей элемента тип «отражение»

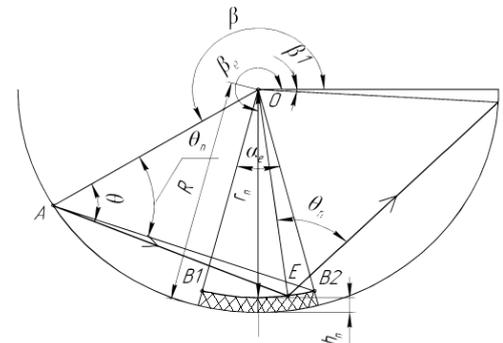


Рис. 7. Основные расчетные параметры моделей элемента типа «пятно»

когерентного и некогерентного оптического излучения / А. Ф. Котюк, В. С. Панасюк, Л. Н. Соломонов, В. И. Сачков, Б. М. Степанов // Измерительная техника. – 1976. - №3. – С. 17 – 24.

2. Купко А. О. Метрологическое обеспечение световых измерений на Украине / А. О. Купко // Светотехника. – 2001. - №5. – С. 38 – 40.

3. Міхеєнко Л. А., Пугіна М. О. Робочий еталон яскравості на базі інтегрувальної сфери з розсіювачем // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015.– №4 – с. 9-15

4. Міхеєнко Л. А., Тимофєєв Л. С. Числовий метод аналізу поля яскравості дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2015.– №5.– с. 120-127

#### References

1. Kotyuk A. F., Panasyuk V. S., Samojlov L. N. Edinaya sistema gosudarstvenny'x e'talonov e'nergeticheskoy fotometrii kogerentnogo i nekogerentnogo opticheskogo izlucheniya. - 1976. - № 3. - p. 17-24

2. Kupko A. O. Metrologicheskoe obespechenie svetovy'x izmerenij na Ukraine. - 2001. - №5. - p. 38-40

3. Mikheyenko L. A., Puhina M. O. Robochij etolon yaskravosti na bazi integrual'noi sfery z rozsiuvachem // Visnyk Vinnyts'kogo politexnichnogo instytutu. -2015. – №4 – s. 9-15

4. Mikheyenko L. A., Tymofeev L. S. Chyslovyi metod analizu polia yaskravosti dyfuznogo vyprominiuvacha na osnovi integrual'noi sfery. Naukovi visti NTUU "KPI". - 2015. - №5. - p. 120-127

Рецензія/Peer review : 21.11.2015 р.

Надрукована/Printed :12.12.2015 р.

**УДК 631.6:556.3**

**О.Б. ШАНДИБА, Д.М. ШПЕТНИЙ, А.В. ТОЛБАТОВ**

Сумський національний аграрний університет

## **ВПЛИВ РОЗЧИННОСТІ ГРАНУЛЬОВАНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ НА ДИНАМІКУ МІГРАЦІЇ РУХОМИХ ВОМПОНЕНТІВ В ГРУНТОВО-ВОДНИХ СИСТЕМАХ СХИЛОВИХ ЗЕМЕЛЬ**

*Міграція небезпечних хімічних речовин в ґрунтово-водних системах становить істотний ризик для здоров'я людей та довкілля. Сьогодні спостерігається зростаюча наукова та суспільна стурбованість щодо доступних моніторингових процедур екологічної оцінки земель сільськогосподарського призначення. Ключова проблема, яка розглядається в статті, полягає у визначенні концентраційного фону забруднень, визначенні ризиків та допустимих рівнів остаточної забрудненості контрольних ділянок.*

*Ключові слова: мінеральні добрива, міграція, забруднення, довкілля, ґрунтово-водна система.*

A.B. SHANDYBA, D.M. SHPETNY, A.V. TOLBATOV

Sumy National Agrarian University, Ukraine

## **INFLUENCE OF GRANULATED FERTILIZERS SOLUBILITY UNDER MIGRATION OF THE CHEMICALS INTO GROUND-WATER SYSTEMS**

*The migration of the moving dangerous chemicals in soil-water systems represents significant risk to public health and environment. At the present time there is growing scientific concern about the available predicting procedures for environmental assessment of contaminated sites and chemical spills. The key problem to be considered here deals with the surface concentration distribution, risk evaluation and allowable residue levels for chemicals.*

*Key words: fertilizers, migration, pollution, environment, soil-water system.*

### **Вступ**

Застосування у сільськогосподарському виробництві гранульованих засобів живлення та захисту рослин, особливо на схилових землях, пов'язане з негативними наслідками міграції рухомих компонентів в поверхневі та ґрунтові води. Удосконалення систем моніторингу стану навколишнього середовища передбачає розвиток технічних засобів контролю та комп'ютеризованих систем моделювання екологічних ситуацій.

**1. Огляд проблеми.** З літератури відомо, що в біогенних ландшафтах геоморфологічна зональність розвитку певних видів рослин багато в чому залежить від геохімічних особливостей сільгоспугідь. Рослини, розташовані ближче до вододілу силових земель мають найбільшу можливість для поглинання легкодоступних, звичайно, добре розчинних хімічних елементів. А рослини, що ростуть нижче, використовують для вегетації елементи, що залишилися, вздовж лінії тока (міграції) аж до аквальних ландшафтів [1–4, 8]. При цьому для нормального розвитку нижче розташованих рослин необхідні в більших кількостях елементи, не поглинені рослинами, що ростуть вище. Сучасний розвиток сільського господарства ведеться без обліку особливостей цього процесу та без відповідного підбора сільськогосподарських культур. Недолік певних хімічних елементів природного походження компенсується внесенням добрив, як правило, гранульованих. Природний процес при цьому порушується, і збільшується забруднення водою біогенними елементами. Зрошення земель приводить до ще більшого вносу із ґрунтів невикористаних рослинами рухомих елементів, що залишилися в межах контрольної ділянки. Крім того, знижується водний стік з неї, тому що значна частина води, використаної для зрошення, не повертається у водойму.

**2. Мета роботи.** Метою проведення досліджень було прийнято збір та узагальнення даних експрес-моніторингу схилкових контрольних ділянок сільськогосподарського призначення на яких застосовувались мінеральні добрива різного гранулометричного складу. Суміжна задача полягала у встановленні аналогії процесів масопереносу для прогнозу міграції токсичних компонентів в місцях неорганізованих звалищ на схилкових землях.

**3. Міграція рухомих компонентів мінеральних добрив.** Фізико-хімічні властивості гранульованих мінеральних добрив, зокрема, їх розчинність в ґрунтово-водних системах сільськогосподарських угідь грають надзвичайно важливу роль як в процесі підживлення рослин, так і у вирішенні екологічних проблем забруднення водних джерел біогенними компонентами. Занадто висока розчинність гранул суттєво збільшує частку рухомих компонентів, що виносяться в ґрунтові або поверхневі води. З іншого боку, низькі показники розчинності добрив є причиною неефективного засвоєння поживних речовин в процесі вегетації. Таким чином, регулювання взаємодії гранульованих засобів живлення та хімічного захисту рослин в ґрунтово-водних системах сільгоспугідь є актуальною проблемою агропромисловості. Для її вирішення запропонована низка заходів, серед яких виробництво органіко-мінеральних добрив пролонгованої дії з оптимальним монодисперсним гранскладом, причому дія модифікованих добрив повинна бути синхронізована з вегетаційними строками розвитку рослин.

Проблеми міграції рухомих забруднюючих компонентів постали і при використанні гранульованих мінеральних добрив. Кінетичні параметри процесу при цьому визначаються не лише типом ґрунтів, інтенсивністю зволоження та їх сорбційною здатністю, але й, значною мірою, рельєфом контрольної ділянки та гранулометричним складом добрив.

Аналіз теоретичної моделі міграції [3, 5, 7, 8] показав, що на контрольній межі (зазвичай, береговій крайці водойми) концентрація забруднення спочатку буде експоненційно зростати до деякого максимуму  $C_{max}$ , що відповідає появі найбільш концентрованих крапель промивної води з опадів, що випали на вододілі (рис.1). Ці краплі на протязі свого шляху від вододілу до контрольної межі поглинають більшу кількість забруднюючих компонентів в порівнянні з краплями, що випали нижче по схилу. Дійсно, шлях крапель зі схилу буде коротшим, а час їхнього контакту із забрудненим ґрунтом, відповідно, меншим. Слід також зауважити, що лінії току крапель промивного потоку будуть перпендикулярні ізолініям контрольної ділянки, тобто рух транспортного потоку міграції забруднень відбуватиметься по лініям градієнта рельєфу (рис.2). В подальшому процесі вимивання, після досягнення максимуму, пов'язаного з прибуттям на контрольну межу перших крапель з вододілу, починається поступове зниження забрудненості лізіметричного фільтрату від атмосферних опадів, що теоретично апроксимується експоненційною функцією часу та параметром акумулюючої здатності ґрунту.

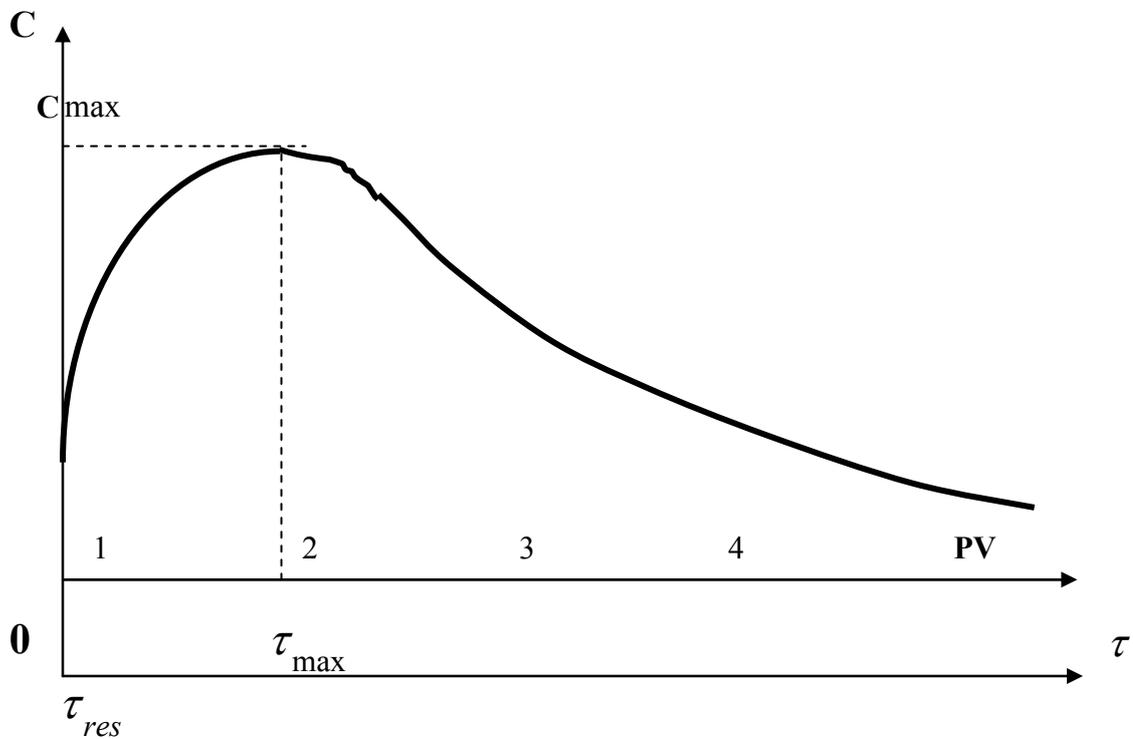


Рис.1. Типова крива забрудненості промивної води в пункті лізіметричного контролю в залежності від тривалості випадання опадів  $\tau$  та об'ємних витрат PV

Вплив гранулометричного складу мінеральних добрив на пікову висоту  $C_{max}$  кривих вимивання теоретично ілюструється порівняльною таблицею 1, де показана залишкова маса гранул різного діаметру (пропорційна його кубу) при однаковій агротехнічній нормі внесення та тривалості опадів.

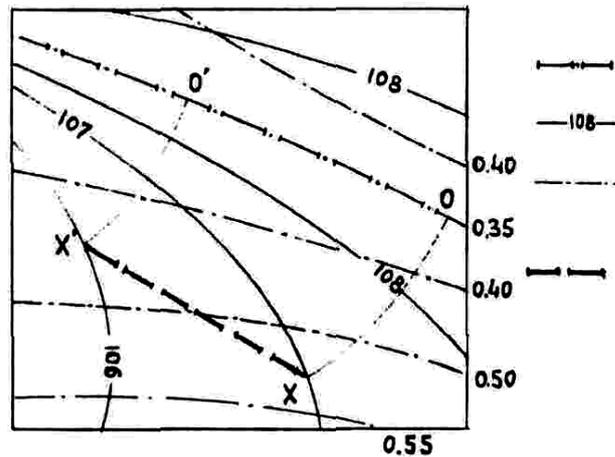


Рис.2. Ізолії відносної забрудненості в залежності від рельєфу контрольної ділянки: 00\* - вододіл; XX\* - контрольна межа; — 108 – ізолії рель'єфу

Таблиця 1

Вплив гранулометричного складу мінеральних добрив на залишкову та розчинену масу гранул

Діаметр гранул, мм	10	8	6	4	2	1
Залишкова маса гранули, %	100	51,2	21,6	6,4	8,0	1,0
Розчинена маса, %	0	48,8	78,4	93,6	92,0	99,0

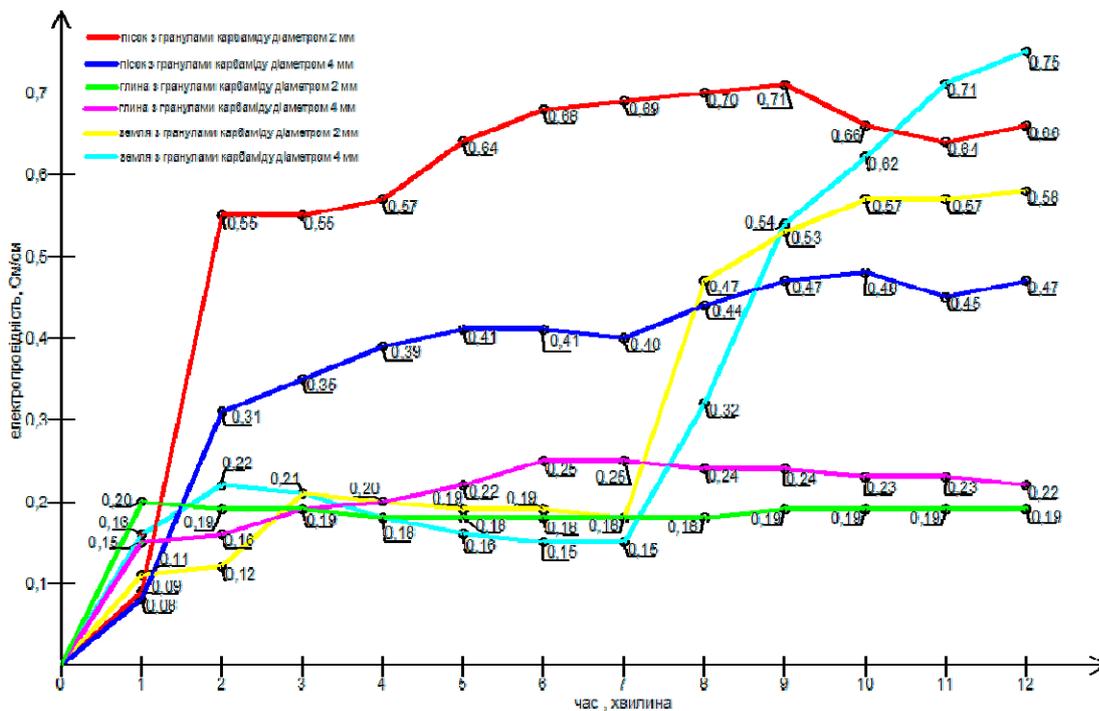


Рис.3. Експериментальні криві забрудненості промивної води в контрольних ділянках в залежності від тривалості опадів, ґрунту та гранулометричного складу добрив

Неважко помітити, що при однаковій тривалості опадів і пропорційному зменшенні діаметра однієї гранули з 10 мм до 8 мм вимивається майже половина її маси 48,8 %. В той же час, при однаковій нормі внесення (2 гранули діаметром 8 мм замість однієї діаметром 10 мм) та однаковій швидкості розчинення з 8 мм до 6 мм залишається  $21,6 \cdot 2 = 43,2$  % внесеної маси гранул, а вимивається, відповідно 56,8 %. Ця тенденція стає ще помітнішою при порівнянні добрив найбільш поширеного грануляційного складу в діапазоні 2 - 4 мм. Тобто пікова висота  $C_{max}$  при збільшенні гранул зменшується, а права гілка кривої вимивання підвищується, приводячи до більш тривалого впливу мінерального добрива.

**4. Методика експериментальних досліджень.** Для експрес-аналізу концентраційного фону рухомих компонентів забруднень був використаний кондуктометр спеціального призначення, в конструкцію якого входили джерело струму, гальванометр, дросель, компенсаційна система, штанга з електродами. З метою розширення діапазону вимірювань та урахування впливу дестабілізуючих факторів і нелінійної залежності електропровідності проводилась термокомпенсація відібраних проб лізіметричної рідини і

автоматичне тарування аналітичних даних. Застосування мікропроцесора дозволило надати приладу ряд додаткових функціональних можливостей.

Дослідний варіант кондуктометра передбачав вимірювання максимальної концентрації забруднення (відповідно електропровідності розчину NaCl) до 4000 мг/л з температурою до 45° С та відносною похибкою 3%. [3, 5].

Розподіл ізольній відносній електропровідності ґрунтового розчину в тонкошаровому дослідному лотку розмірами 100×60×10 см (рис.6) свідчить не тільки про вплив ширини та рельєфу водоохоронних зон на міграцію рухомих сольових забруднень до крайки води (нижньої межі водоохоронної зони), але й про можливості кондуктометричних методів експрес-аналізу [3].

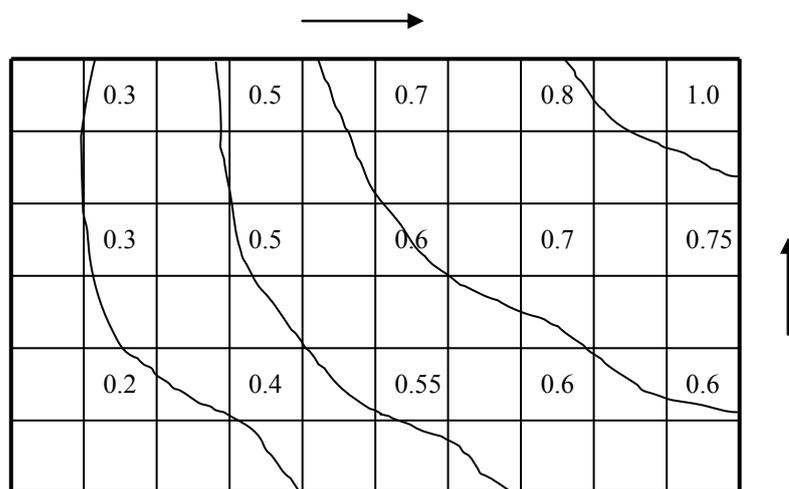


Рис. 4. Розподіл ізольній відносній електропровідності ґрунтового розчину в залежності від нахилу дослідного лотка

**5. Міграція токсичних компонентів в місцях неорганізованих звалищ.** Аналіз значної кількості експериментальних моніторингових досліджень місць неорганізованих звалищ також показав загальну тенденцію експоненційного наростання концентрацій забруднення на межі лізіметричного контролю, яка може співпадати з крайкою уріза води поверхневої водойми (рис.5).

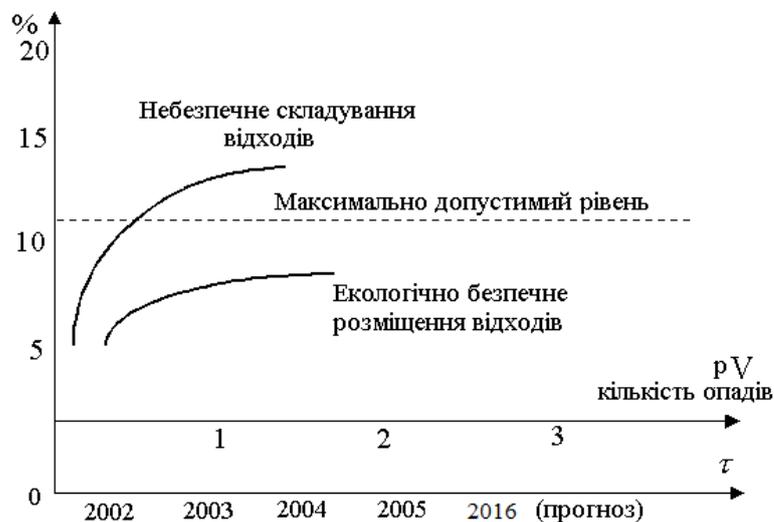


Рис.5. Прогнозні криві міграції токсичних компонентів в місцях неорганізованих звалищ

**Висновки.** На підставі геогідродинамічного обґрунтування запропонована інтегральна модель масопереносу та міграції рухомих компонентів забруднень на схиліх землях та методика визначення геогідродинамічних параметрів.

Дослідженнями міграційних властивостей рухомих форм забруднень визначені статистичні характеристики впливу параметрів водоохоронних зон на їх захисні функції. Збереження водоохоронних зон в належному стані є надзвичайно актуальним в умовах зростання техногенного навантаження на водойми та негативного впливу глобального потепління.

Геогідродинамічні параметри забруднень і, зокрема, гранулометричний склад міндобриб суттєво впливає на пікову концентрацію  $C_{max}$  кривих вимивання та інтенсивність міграції.

Література

1. Кац Д.М., Пашковский И.С. Мелиоративная гидрогеология. - М.: Агропромиздат, 1988.- 256 с.
2. Барбашев С.В., Пристер Б.С. Применение экспертных систем для управления окружающей средой в районах расположения АЭС -.- Зб. наук. статей VI Міжнародної науково-практичної конференції “Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення”, т. 2 /УКРНДІЕП.-Х., Райдер, 2010.- с. 70 - 75.
3. Шандиба О.Б., Кузема О.С. Застосування кондуктометрії для моніторингу ґрунтово-водних систем забруднених територій.- Зб. наук. статей IV Міжнародної науково-практичної конференції “Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення”, т. 2 /УКРНДІЕП.-Х., Райдер, 2008.- с. 255-260.
4. Rasig H. Editing Environmental Data with a PC-based GIS,- UTA Technology & Environment N 2, December 1996, Intern. Ed.,- p.190-192.
5. Shandyba A.B. Ecology Forecast for Migration of the Chemical Substances into Ground and Surface Water.- Fresenius Environ. Bulletin., vol.4, Basel, Switzerland, 1995.- pp.80-85.
6. Веригин Н.Н. Основы теории растворения и вымыва солей при фильтрации воды в горных породах и грунтах.- В кн.: Инженерно-геологические свойства горных пород и методы их изучения.- М.: Изд-во АН СССР, 1962, С.59-70.
7. B. Shandyba, D. M. Shpetny. 2015. Pollution migration forecast for soil geochemistry mapping. Geomatics, Landmanagement and Landscape.No. 3 • 2015, 101–112.
8. Шандиба О. Б., Шпетний Д.М. Курило А.О. Инновационные подходы к развитию эколого-биологических исследований. Прогнозування міграції токсичних компонентів на забруднених територіях // Монографія. – Одеса: КУПРИЕНКО СВ, 2015.

#### References

1. Kacz D.M., Pashkovsky`j Y`.S. Mely`oraty`vnaya gy`drogeology`ya. - M.: Agropromy`zdat, 1988.- 256 s.
2. Barbashev S.V., Pry`ster B.S. Pry`meneny`e ekspertny`x sy`stem dlya upravleny`ya okruzhayushhej sredoj v rajonax raspolozheny`ya AES -.- Zb. nauk. statej VI Mizhnarodnoyi naukovy`prakti`chnoyi konferenciyi “Ekologichna bezpeka: problemy` i shlyaxy` vy`rishennya”, t. 2 /UKRNDIEP.-X., Rajder, 2010.- s. 70 - 75.
3. Shandy`ba O.B., Kuzema O.S. Zastosuvannya konduktometriyi dlya monitory`ngu gruntovo-vodny`x sy`stem zabrudnemy`x tery`torij.- Zb. nauk. statej IV Mizhnarodnoyi naukovy`prakti`chnoyi konferenciyi “Ekologichna bezpeka: problemy` i shlyaxy` vy`rishennya”, t. 2 /UKRNDIEP.-X., Rajder, 2008.- s. 255-260.
4. Rasig H. Editing Environmental Data with a PC-based GIS,- UTA Technology & Environment N 2, December 1996, Intern. Ed.,- p.190-192.
5. Shandyba A.B. Ecology Forecast for Migration of the Chemical Substances into Ground and Surface Water.- Fresenius Environ. Bulletin., vol.4, Basel, Switzerland, 1995.- pp.80-85.
6. Very`gy`n N.N. Osnovy teory`y` rastvoreny`ya y` vymyva solej pry` fy`l`tracy`y` vody v gornyx porodax y` gruntax.- V kn.: Y`nzhenerno-geology`chesky`e svojstva gornyx porod y` metody`y`x y`zucheny`ya.- M.: Y`zd-vo AN SSSR, 1962, S.59-70.
7. B. Shandyba, D. M. Shpetny. 2015. Pollution migration forecast for soil geochemistry mapping. Geomatics, Landmanagement and Landscape.No. 3 • 2015, 101–112.
8. Shandyba O. B., Shpetnyy D.M. Kurylo A.O. Y`nnovatsyonnye podkhody k razvytyyu ekoloho-byolohy`cheskykh yssledovanyu. Prohnozuvannya mihratsiyi toksy`chnykh komponentiv na zabrudnemy`x tery`toriyakh // Monohrafiya. – Odessa: KUPRYENKO SV, 2015.

Рецензія/Peer review : 13.11.2015 р.

Надрукована/Printed :19.12.2015 р.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКАНИРУЮЩЕГО ОПТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*В настоящее время получение трехмерных изображений в разных отраслях промышленности, например, при изготовлении микро-электро-механических систем, печатных плат и микросхем, анализе поверхностей различных материалов является актуальной технической задачей. В работе рассматривается новый теневой метод для получения изображений профиля поверхностей. Представлена геометрическая модель для определения высоты профиля поверхности и ширины перехода светлого-темного поля по методу теневой проекции профиля. Выполнен анализ теоретически рассчитанных и экспериментально полученных результатов измерений.*

*Ключевые слова: оптический микроскоп, теневой метод, профиль поверхности, математическая модель.*

A. FESENKO, V. BOROVYTSKY

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

### MATHEMATICAL APPARATUS FOR SCANNING OPTICAL MICROSCOPE TO OBTAINING 3D IMAGES

*Nowadays obtaining 3D images of different surfaces are recently used in wide field of industries – micro-electro-mechanical systems, printed circuit boards and chips, analyzing surfaces of various materials and other. The paper presents the new shadow-sectioning method for imaging the surface profile. Proposed geometric model to determine the height and width of the surface profile of the light-dark region of the field in the shadow-sectioning method. The analysis of the theoretically calculated and experimental results.*

*Key words: optical microscope, 3D image, shadow method, mathematical model.*

#### Введение

Нынешние темпы развития технологий имеют выраженный тренд к миниатюризации, что привело к появлению микро-электро-механических систем, расширению применения микро-оптических компонентов, создания электронных микрокомпонентов, покрытий и т.д., изготавливаемых литографией, травлением, спеканием и другими технологическими процессами. Такого рода элементы с размерами от долей микрона до сотен микрон и возникает необходимость контролировать процесс их изготовления с помощью оптической микроскопии. Однако традиционная оптическая микроскопия была ориентирована на оценку геометрических параметров (координат, размеров) объектов в двумерной системе координат – в плоскости, перпендикулярной оптической оси микроскопа. В настоящее время все актуальнее становится интерес к трехмерным изображениям в оптической микроскопии.

Существующие современные методы формирования трехмерных изображений [1], такие как интерференционный, голографический, конфокальный и др. наряду со своими преимуществами обладают недостатками:

- высокая цена оборудования (интерференционные микроскопы - от 10 000 \$, лазерные конфокальные сканирующие микроскопы - от 60 000 \$, конфокальные микроскопы – от 10 000 \$);
- чувствительность к внешним воздействиям – вибрациям, нагреву и т.п.;
- сложность управления, сложность и ограничения цифровой обработки изображений и др.

В работе [2] был предложен теневой метод измерения трехмерного профиля поверхности, который может быть реализован простой и экономичной конструкцией в виде модуля. Этот модуль можно использовать на обычном оптическом микроскопе (ОМ).

Для проектирования такого модуля необходимо произвести расчеты осевых расстояний, реальных размеров источника излучения и границы перехода между светлым и темным полями. В работе рассматривается геометрическая модель, которая описывает нахождение высоты профиля поверхности и переход между светлым и темным полем.

Рассмотрим измерение высоты профиля поверхности (рис. 1). Как видно из рисунка, проекция высоты профиля поверхности, находящейся под углом к оси микроскопа, в предметную плоскость ОМ, находится по формуле 1.

$$y_h = \frac{h}{\cos(\alpha_2)} \quad (1),$$

Для того, чтобы определить разность высоты профиля, на образец проецируется тень лезвия. Таким образом, на объекте формируется светлое и темное поле. Граница полей будет проходить по поверхности образца. Разница высоты разных зон профиля, для разных его зон, будет определяться исходя из измеренного расстояния между его зонами, другими словами, по искривлению границы полей в плоскости изображения микроскопа. Для реализации данного метода полагаем, что выполняется условие  $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$ .

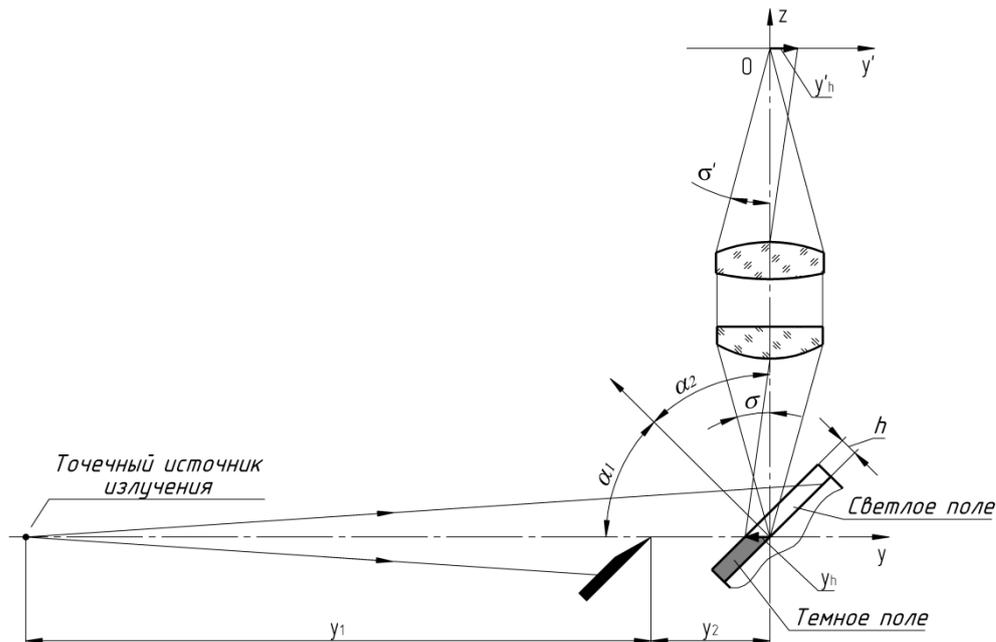


Рис. 1. Теневого метод получения профиля поверхности

Определим высоту профиля поверхности в плоскости изображения микроскопа:

$$y'_h = \beta \cdot y_h = \frac{\beta \cdot h}{\cos(\alpha_2)} \quad (2),$$

В современных ОМ используют цифровые камеры на основе ПЗС-матриц, размер фоточувствительных элементов (ФЧЭ) которых варьируется от 1 до 10 мкм. Таким образом, стоит задача определения количества ФЧЭ, приходящихся на высоту профиля.

$$N_{\pi} = \frac{y'_h}{Y_p} = \frac{\beta \cdot h}{Y_p \cdot \cos(\alpha_2)} \quad (3),$$

где  $Y_p$  – период фоточувствительных элементов вдоль оси  $y'$ .

Также из формулы 3 можно определить теоретическую минимально различимую высоту профиля поверхности, равную одному ФЧЭ:

$$h_{min} = \frac{Y_p \cdot \cos(\alpha_2)}{\beta} \quad (4)$$

Данное значение не учитывает погрешностей, возникающих при оценке ширины перехода между светлым и темным полями, т.к. источник излучения считается точечным.

Следовательно, становится актуальным расчет ширины перехода и количество ФЧЭ, приходящиеся на этот переход (рис. 2). Рассчитаем величину проекции на плоскость предметов микроскопа перепада освещенности на поверхности образца, т.е.  $\Delta y_h$  и  $\Delta y_0$  (рис. 2а, 2б).

Как видно из рис. 2б, для нахождения данных значений можно воспользоваться геометрическими соотношениями для треугольников, для чего введем обозначения:

$$|KO| = h, \quad |BO| = y_h, \quad |AO| = y_2, \quad |C'D'| = \Delta y_h, \quad |L'M'| = \Delta y_0.$$

Необходимо найти  $|C'D'|$  и  $|L'M'|$  – проекции перехода светлого и темного поля на плоскость предметов микроскопа на разных высотах.

$$\xi = \arctg\left(\frac{d_{ср}}{2 \cdot y_1}\right) \quad (5),$$

Для нахождения крайних точек данных отрезков, запишем уравнения прямых, содержащих отрезки: AL, AM, CD и LM (рис. 3):

$$z_{AM}(y) = \operatorname{tg} \xi \cdot (y + y_2);$$

$$z_{AL}(y) = -\operatorname{tg} \xi \cdot (y + y_2);$$

$$z_{LM}(y) = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot y = \operatorname{ctg}(\alpha) \cdot y;$$

$$z_{CD}(y) = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \left(y + \frac{h}{\cos \alpha}\right) = \operatorname{ctg}(\alpha) \cdot \left(y + \frac{h}{\cos \alpha}\right).$$

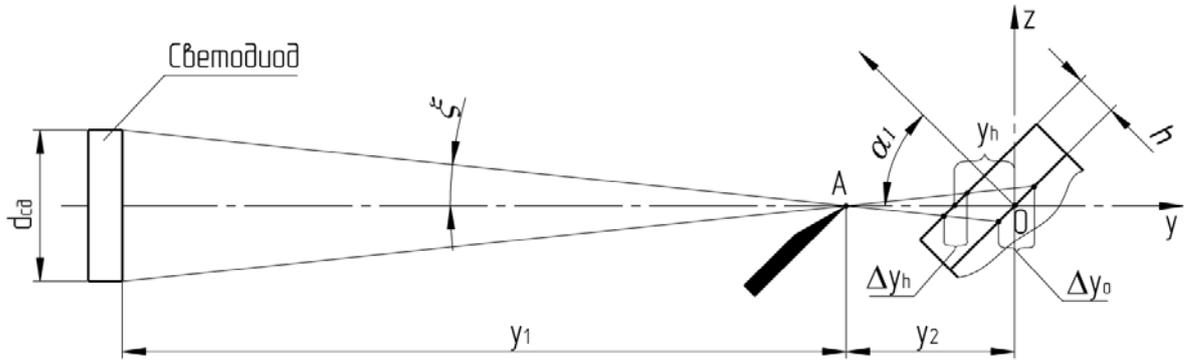


Рис. 2. Основные геометрические соотношения в теновом методе

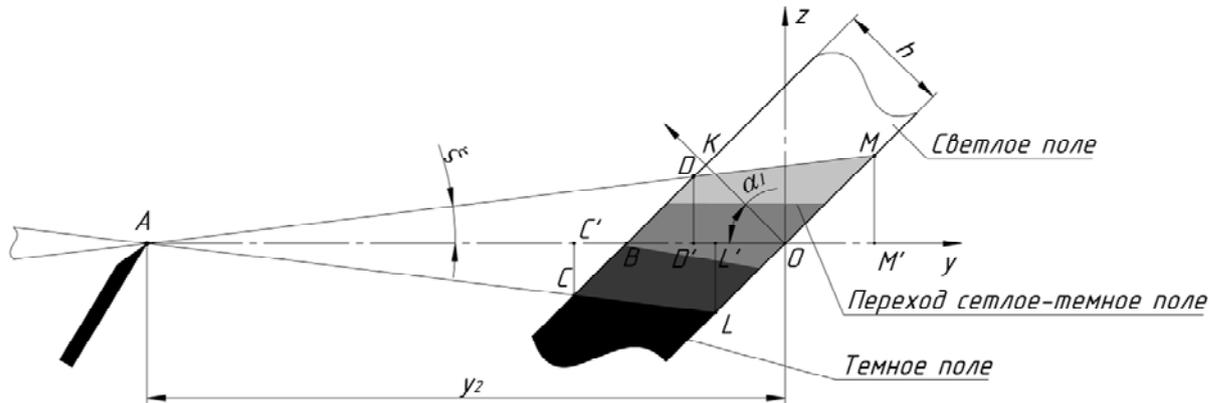


Рис. 3. Схема хода лучей для определения ширины перехода между светлым и темным полями

Находим координаты  $Y$  точек  $C'$ ,  $D'$ ,  $L'$  и  $M'$ , являющиеся проекциями точек  $C$ ,  $D$ ,  $L$  и  $M$  на ось  $y$ , через уравнения прямых  $AM$  и  $CD$  по формулам (6) – (12).

$$tg\xi \cdot (y'_D + y_2) = tg\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \left(y'_D + \frac{h}{\cos\alpha}\right) \quad (6)$$

$$y'_D = \frac{\sin\xi \cdot \sin\alpha \cdot y_2 - \cos\xi \cdot h}{\cos(\alpha + \xi)} \quad (7)$$

$$-tg\xi \cdot (y'_C + y_2) = tg\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \left(y'_C + \frac{h}{\cos\alpha}\right) \quad (8)$$

$$y'_C = -\frac{\sin\xi \cdot \sin\alpha \cdot y_2 + \cos\xi \cdot h}{\cos(\alpha - \xi)} \quad (9)$$

$$tg\xi \cdot (y'_M + y_2) = tg\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot y'_M \quad (10)$$

$$y'_M = \frac{\sin\xi \cdot \sin\alpha \cdot y_2}{\cos(\alpha + \xi)} \quad (11)$$

$$-tg\xi \cdot (y'_L + y_2) = tg\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot y'_L \quad (12)$$

$$y'_L = -\frac{\sin\xi \cdot \sin\alpha \cdot y_2}{\cos(\alpha - \xi)} \quad (13)$$

Подставляя определенные координаты точек (7, 9, 11, 13) в уравнения для нахождения длины прямых  $\Delta y_h$  и  $\Delta y_0$  (14) и (15):

$$\begin{aligned} \Delta y_h = |C'D'| &= |y'_C - y'_D| = \left| -\frac{\sin\xi \cdot \sin\alpha \cdot y_2 + \cos\xi \cdot h}{\cos(\alpha - \xi)} - \frac{\sin\xi \cdot \sin\alpha \cdot y_2 - \cos\xi \cdot h}{\cos(\alpha + \xi)} \right| =; \\ &= \left| \frac{h \cdot \sin(2\xi) \cdot \sin\alpha - \frac{y_2^2}{2} \sin(2\xi) \cdot \sin(2\alpha)}{\cos^2(\alpha) + \cos^2(\xi) - 1} \right| \quad (14) \end{aligned}$$

$$\Delta y_0 = |L'M'| = |y'_L - y'_M| = \left| -\frac{\sin\xi \cdot \sin\alpha \cdot y_2}{\cos(\alpha - \xi)} - \frac{\sin\xi \cdot \sin\alpha \cdot y_2}{\cos(\alpha + \xi)} \right| = \quad (15)$$

$$= \left| \frac{\frac{1}{2} \gamma_2 \cdot \sin(2\xi) \cdot \sin(2\alpha)}{\sin^2(\alpha) + \sin^2(\xi) - 1} \right|$$

Для расчета соответствующего ширине перехода количества ФЧЭ в изображении воспользуемся выражениями (12) и (13):

$$\Delta N_h = \frac{\beta \cdot \Delta y_h}{Y_p}, \tag{16}$$

$$\Delta N_0 = \frac{\beta \cdot \Delta y_0}{Y_p} \tag{17}$$

Подставив выведенные значения из формул 10 и 11 в 12 и 13, получим:

$$\Delta N_h = \frac{\beta \cdot \left| \frac{h \cdot \sin(2\xi) \cdot \sin \alpha - \frac{Y_2}{2} \cdot \sin(2\xi) \cdot \sin(2\alpha)}{\cos^2(\alpha) + \cos^2(\xi) - 1} \right|}{Y_p} \tag{18}$$

$$\Delta N_0 = \frac{\beta \cdot \left| \frac{\frac{1}{2} \gamma_2 \cdot \sin(2\xi) \cdot \sin(2\alpha)}{\sin^2(\alpha) + \sin^2(\xi) - 1} \right|}{Y_p} \tag{19}$$

Таким образом, выражения (18) и (19) позволяют рассчитать количество ФЧЭ приходящихся на ширину перехода между светлым и темным полями.

По приведенным формулам можно построить графики (рис. 4) зависимостей от выходных данных, таких как: 1) размера светодиода, 2) расстояния от светодиода до лезвия, 3) расстояния от лезвия до образца.

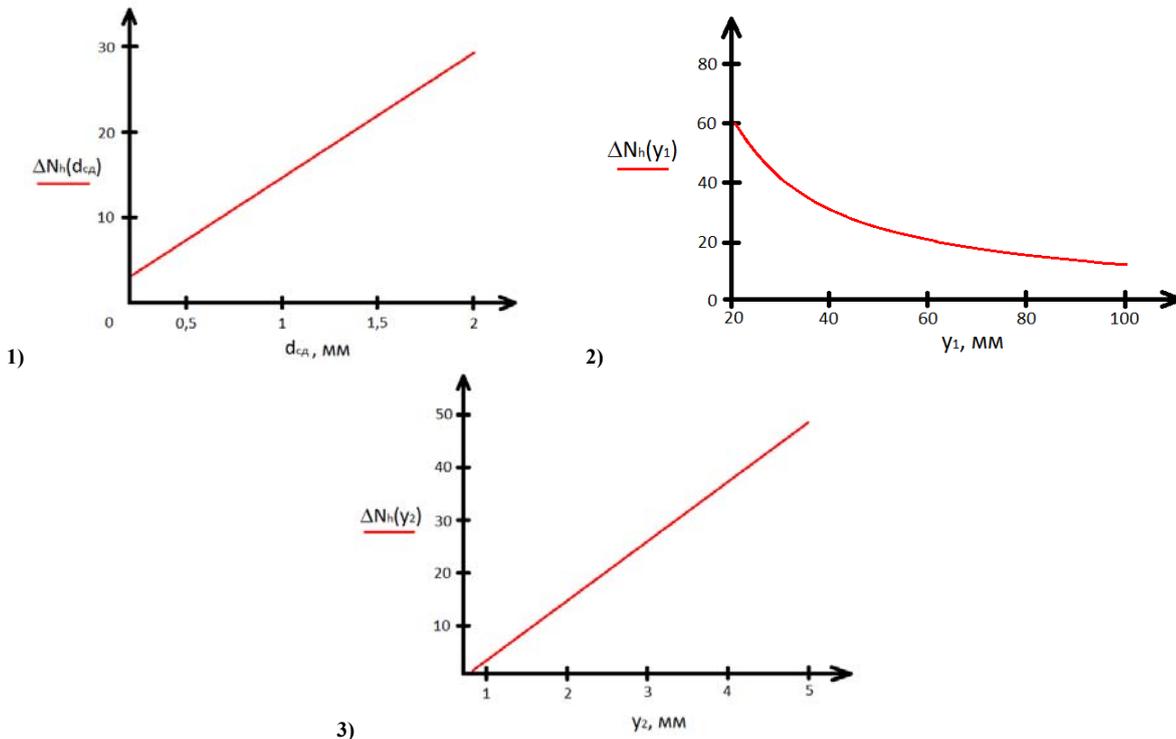


Рис. 4. Графики зависимостей количества ФЧЭ, приходящихся на переход между светлым и темным полями к: а) размера светодиода; б) расстояния от светодиода до лезвия; в) расстояния от лезвия до образца.

Таблица 1

**Параметры модуля для оптического микроскопа**

Расстояние от светодиода до ножа Фуко	$y_1$	110 мм
Расстояние от ножа Фуко до исследуемого образца	$y_2$	1,5 мм
Размер излучающей площадки светодиода	$d_{cv}$	1,5 мм
Угол падения излучения на исследуемый объект	$S_1$	45°
Длина волны излучения	$\lambda$	0,53 мкм
Габариты		220x65x55 мм
Питание		5 В

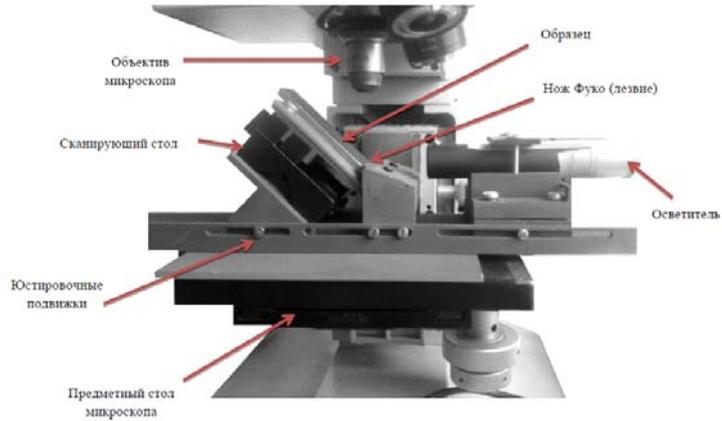


Рис. 5. Фотография модуля для получения трехмерного профиля поверхности теньвым методом

Модуль для получения трехмерного профиля поверхности теньвым методом и изображения, полученные на нем, показаны на рис. 5 и 6. Также на рис. 6 приведены графики, показывающие ширину перехода светлого-темного поля, соответствующие зоне, обозначенной белой линией на изображении объекта.

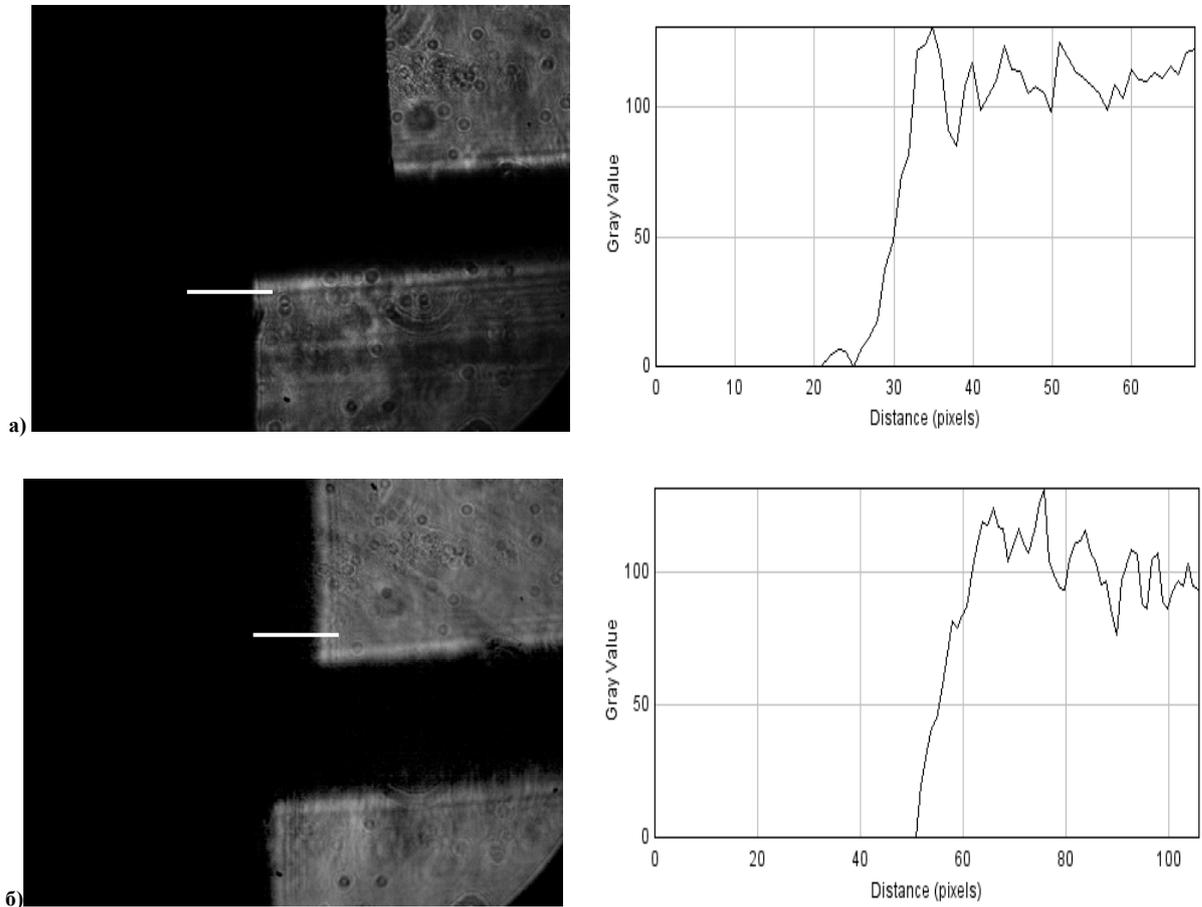


Рис. 6. Пример полученных изображений концевых мер длины с перепадом высот: а) 0,5 мм; б) 0,1 мм; в) 0,02 мм (слева) и графики реальной ширины перехода темного-светлого поля

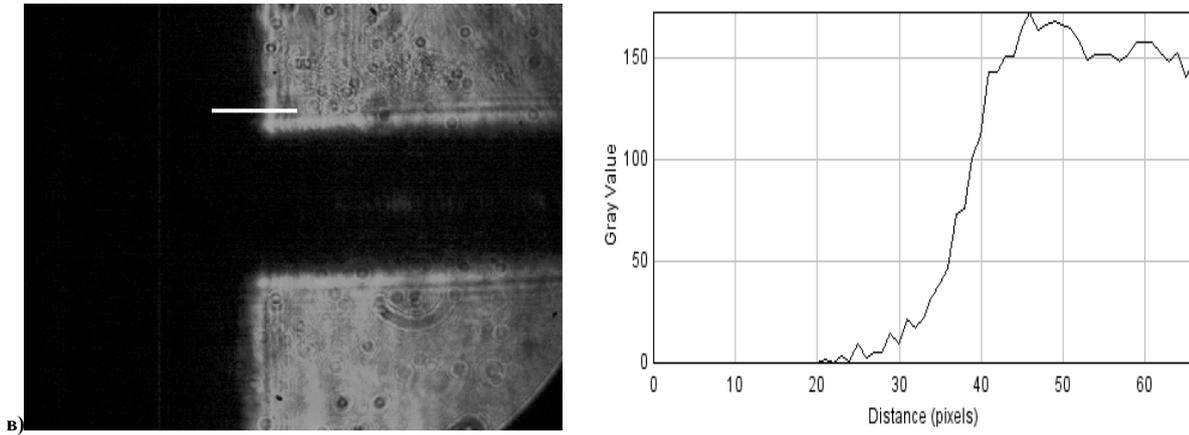


Рис. 6. Пример полученных изображений концевых мер длины с перепадом высот: а) 0,5 мм; б) 0,1 мм; в) 0,02 мм (слева) и графики реальной ширины перехода темного-светлого поля (продолжения)

В табл. 2 приведены расчетные и измеренные количества ФЧЭ, приходящиеся на переход светлого и темного полей, при разных расстояниях от источника до лезвия и фиксированном расстоянии от лезвия до образца.

Таблица 2

**Расчетные и экспериментально измеренные величины ширины перехода светлого-темного поля**

$y_1$ , мм	Расчетное кол-во ФЧЭ	Экспериментальное кол-во ФЧЭ	Абсолютное отклонение	Относительное отклонение, %
110	7 (6,931)	7	0	0%
120	6 (6,353)	6	0	0%
130	6 (5,856)	6	0	0%
140	5 (5,446)	6	1	16%
150	5 (5,083)	6	1	16%

Как видно из табл. 2. расчетные данные сходятся с экспериментальной частью с минимально возможной погрешностью равной величине дискретизации цифрового изображения в 1 пиксел. Это подтверждает достоверность предложенной математической модели.

**Выводы**

В работе представлен математический аппарат, который позволяет рассчитать высоту профиля поверхности и ширину перехода светлого-темного поля по методу теневой проекции профиля в цифровом ОМ. Экспериментальные исследования подтвердили достоверность теоретических исследований.

**Литература**

1. Фесенко А.В. Современное состояние оптической микроскопии для получения трехмерных изображений / А.В. Фесенко, В.Н. Боровицкий // Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. – 2015.– №1.– с. 62-72.
2. Фесенко А.В. Новый теневой метод получения профиля поверхности в оптической микроскопии / А.В. Фесенко, В.Н. Боровицкий // Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. – 2015.– №2.– с. 222-226.
3. G. Holst. CCD arrays, cameras and displays / SPIE Press.– JCD Publishing.– 1998.– pp. 378.

**References**

1. Fesenko A.V. Sovremennoe sostojanie opticheskoj mikroskopii dlja poluchenija trehmernyh izobrazenij. / Fesenko A.V., Borovytsky V.N // Izmeritel'naja i vychislitel'naja tehnika v tehnologicheskix processah. – 2015. – №1. – pp. 62-72.
2. Fesenko A.V. Novyj tenevoj metod poluchenija profila poverhnosti v opticheskoj mikroskopii. / Fesenko A.V., Borovytsky V.N // Izmeritel'naja i vychislitel'naja tehnika v tehnologicheskix processah. – 2015. – №2. – pp. 222-226.
3. G. Holst. CCD arrays, cameras and displays / SPIE Press.– JCD Publishing.– 1998.– pp. 378

Рецензія/Peer review : 11.11.2015 р.      Надрукована/Printed : 12.12.2015 р.

УДК 537.525

Т. Х. ГУСЕЙНОВ, М. Н. АГАЕВ, Э. А. РАСУЛОВ

Бакинский государственный Университет, Азербайджан

РЕЛАКСАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ДВОЙНОМ СЛОЕ  
В ПЛАЗМЕ РТУТНОГО РАЗРЯДА

*Исследован двойной слой в плазме ртутного разряда с помощью двух зондов. Измерения, проведенные при частотах от 300 МГц до 700 кГц, показали, что пространственное распределение амплитуды высокочастотного поля имеет максимум в анодной плазме, смещенный приблизительно на несколько см от двойных слоев. Амплитуда поля имеет максимум вблизи плазменной частоты. Пространственно коррелированные измерения показали, что эти высокочастотные колебания распространяются в сторону анода с постоянной фазовой скоростью, на 10-20% ниже скорости пучка электронов. Эти факты подтверждают механизм энергообмена электронов пучка и плазмы посредством возбуждения поля пучком, а затем передачи энергии волны плазменным электронам.*

**Ключевые слова:** двойной слой, ртутная плазма, релаксация электронов в двойном слое.

TARLAN KHANBABA HUSEYNOV, NUKHBALA AGAYEV MUSTAFA, ELDAR AYDIN RASULOV

Baku State University, Azerbaijan

## RELAXATION OF ELECTRONS IN THE DOUBLE LAYER MERCURY DISCHARGE PLASMA

**Annotation.** *The double layer in mercury plasma discharge has been investigated by the help two probe. The measurements at frequency from 300 MHz to 700 kHz showed that spatial distribution of mercury of high-frequency field amplitude has a maximum in anode plasma, shifted approximately from a few centimeter of double layer. The amplitude of field shows a maximum near the plasma frequency. The spatial correlation measurements show that these high-frequency oscillations spread to the anode side with constant phase velocity, which 10-20% less than the velocity of electrons. These facts confirm the mechanism of energy change of electrons beam and plasma with the help of field beam excitation, and transition of field energy by plasma electrons.*

**Key words:** double layer, mercury plasma, relaxation of electrons in double layer.

## Введение

Проблеме двойных слоёв (ДС) посвящены эксперименты по измерению градиентов концентраций [1-5] и углового распределения частиц в различных слоях ионосферы и магнитосферы Земли, выполненные с помощью ракет. В этих экспериментах были обнаружены большие (до 60% на км) горизонтальные и вертикальные градиенты концентраций заряженных частиц и пики в угловом распределении, что могло быть связано с заметными разностями потенциалов. Оценки этих разностей потенциалов из измерений градиентов концентраций на высотах 250-380 км привели к значениям в несколько сот вольт.

Интерпретация получаемых в этих экспериментах больших разностей потенциалов с точки зрения моделирования процессов в магнитосфере Земли представляется несколько сомнительной, т. к. задавая потенциалы между сетками камеры мишени мы, тем самым, задаем значение падения потенциала в ДС. С этой точки зрения более корректным является постановка вопроса в работах [7,8], где задается источник тока, а разность потенциалов в ДС устанавливается в процессе формирования ДС. В работе [9-11] с использованием вспомогательного электрода измеряется разности потенциалов в ДС. В этих работах ДС имели разности потенциалов, порядка энергии электронов пучка и несколько превосходящие ее.

При наличии в плазме колебаний зондовые измерения должны проводиться так, чтобы можно было определить мгновенные формы вольтамперных характеристик (ВАХ) и их производных, а также значения потенциала в точке расположения зонда. Известно, что при определенном потенциале зонда  $U_n$ , наложенного извне величина зондового тока определяется разностью потенциалов зонда и мгновенного значения потенциала пространства  $U_n - U_p$ , концентрациями электронов и ионов, а также функцией распределения электронов по энергиям (или же  $T_e$  в случае максвелловского распределения). Изменения этих величин во времени приводят к искажению ВАХ и определенных по ним параметров плазмы. Однако в некоторых случаях можно измерить среднюю ВАХ методом следящего зонда и по ней вычислить средние значения параметров плазмы.

## 1. Экспериментальная установка

Схема измерений приведена на рис. 1. В плазму вводились два тонких цилиндрических зонда, один из которых был ориентирован вдоль, а другой – поперек пучка. Параллельный зонд воспринимал пучок только небольшой площадью торца, в то время как поперечный – всей полуцилиндрической боковой поверхностью. Общие площади зондов были равны, а токи из-за тепловых электронов практически одинаковы на обоих зондах.

Из зависимости различных токов зондов от потенциала можно получить оценку пучковой части распределения электронов. Усилители служили для одинакового линейного изменения потенциалов зондов во времени. Падения потенциалов на резисторах  $r_1$  и  $r_2$ , пропорциональные зондовым токам, подавались на

вход вычитающего модуля М-165, и далее с помощью дифференцирующей цепочки получалась первая производная разности сигналов. Этот сигнал подавался на Y – вход двухкоординатного самопишущего потенциометра, а на X – вход подавался линейно изменяющийся зондовый потенциал.

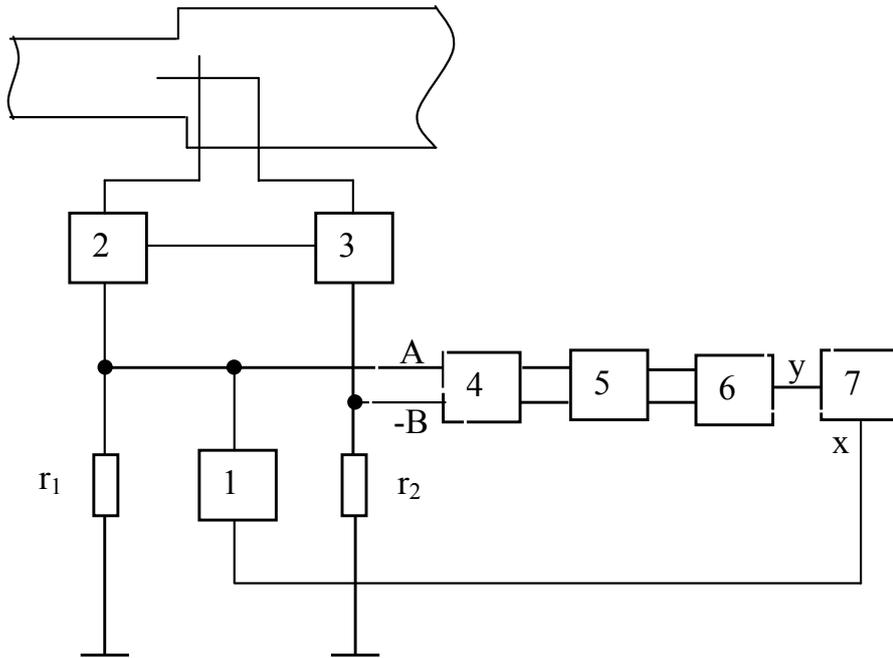


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки.  
 1 – источник линейно изменяющегося напряжения; 2, 3 – усилители; 4 – модуль М-165;  
 5 – дифференцирующая цепочка; 6 – фильтр; 7 – двухкоординатный самопишущий потенциометр

### 2. Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 2 приведены первые производные разности токов поперечного и продольного зондов, измеренные в различных точках вдоль области взаимодействия пучок-плазма. Для исключения гистерезиса измерения проводились в обоих направлениях изменения потенциала зондов. Максимумы  $d(j_{\perp} - j_{\parallel})/dU$  на рис. 2 соответствуют пучку электронов. Кривые демонстрируют постепенное рассеяние пучка в плазме.

Следует отметить, что при измерении величины  $d(j_{\perp} - j_{\parallel})/dU$  описанным способом автоматически исключается погрешность, связанная с колебаниями потенциала пространства. Тот факт, что  $d(j_{\perp} - j_{\parallel})/dU$  не обращается в нуль при потенциалах, соответствующих энергиям тепловых электронов, можно объяснить наличием продольного магнитного поля.

Парные столкновения не могут объяснить наблюдаемого сильного энергообмена, получаемого из сравнения рис. 3, 2, так как длина свободного пробега электронов существенно превосходит длину анодной плазмы. Такую быструю релаксацию ускоренных в ДС электронов можно объяснить потерей энергии пучка на возбуждение колебаний. Действительно, при распространении электронного пучка относительно малой плотности в сравнительно плотной плазме с замагниченными электронами и немагниченными ионами дисперсионное уравнение имеет вид [6]:

$$\frac{\omega_p^2}{\omega^2} + \beta \frac{\omega_p^2}{(\omega - ku)^2} = 1; \quad \beta = \frac{\omega_p^2}{\omega_p^2} = \frac{n_1}{n_p} \ll 1 \tag{1}$$

где  $\omega_p$  и  $\omega_1$  – электронная ленгмюровская частота плазмы и пучка,  $k$  – волновое число,  $u$  – скорость частиц пучка,  $n_1, n_p$  – концентрация электронов пучка и плазмы. Из этого уравнения следует, что при условии

$$\omega_p^2 > k^2 u^2 \tag{2}$$

возникает неустойчивость. При этом возникают колебания с частотой

$$\omega = k_x u \left[ 1 + \left( \frac{n_1}{n_p} \right)^{1/3} \right]^{-1} \tag{3}$$

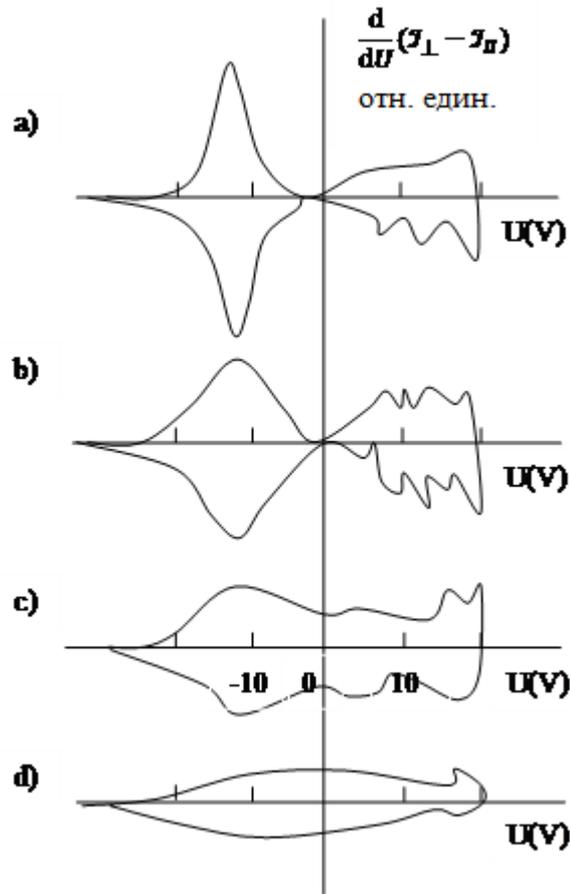


Рис. 2. Первые производные разности токов поперечного и продольного зондов, измеренные в плазме на расстояниях: а – 0,5, б – 2, с – 6, д – 12 см от начала области взаимодействия пучок-плазма.

Максимальный инкремент этих колебаний

$$\gamma = \frac{\sqrt{3}}{2^{4/3}} \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^{1/3} \frac{\kappa_2}{\kappa} \omega_p \quad (4)$$

Из выражения (2) следует, что неустойчивость имеет место при любой плотности пучка. В этом случае плотность пучка влияет только на инкремент и частоту колебаний.

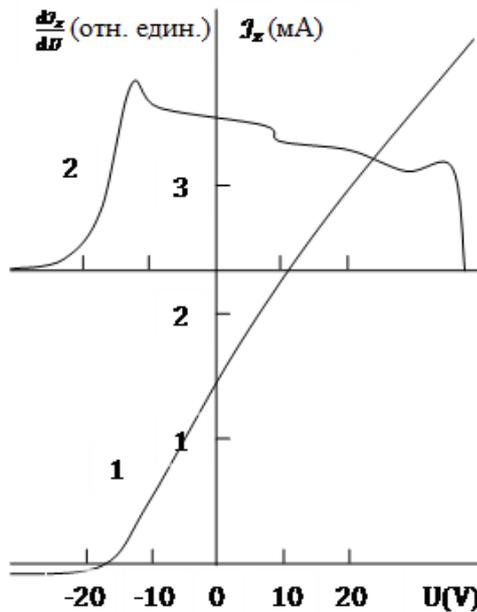


Рис. 3. Вольтамперная характеристика зонда (1) и ее первая производная (2), измеренная в катодной плазме на расстоянии 5 см от ДС. Уровень – 5,05 В, число измерительных строб в направлении роста потенциала  $5,5 \cdot 10^4$  в 1 с.

Определенные из рис. 3 концентрации  $n_{i1}$  имеют значения  $6,1 \cdot 10^{15}$  и  $2 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3}$ . Подстановка этих

значений в (3) с использованием  $\mathbf{E}_z = \omega_p / \omega$  дает частоту колебаний  $3,5 \cdot 10^8$  Гц, что несущественно отличается от  $\omega_p / 2\pi$ .

### Заключение

При поперечном изменении положительного столба образуется двойной слой. В области ДС электроны ускоряются и образуют пучок. После прохождения электронов через ДС, на анодной стороне на расстоянии нескольких сантиметров от ДС пучок быстро рассеивается. Это указывает на интенсивный энергообмен между электронами пучка и плазмы. Быструю релаксацию ускоренных в ДС электронов можно объяснить потерей энергии пучка на возбуждение колебаний.

Неустойчивость имеет место при любой плотности пучка. В нашем случае плотность пучка влияет только на инкремент и частоту колебаний.

### Литература

1. Block L. Acceleration of crucial particles by electric double Layer / L. Block // *Earth's Magnetospheric Processes* / ed. B. M. McCormac. – New York : Springer, 1972. – P. 258–267.
2. Block L. A double layer review / L. Block // *Astrophysics. Space Sci.* – 1978. – Vol. 55. – P. 59-83.
3. Calvert W. Steep Horizontal Electron- Density Gradients in the Topside P-Layer / W. Calvert // *Journal. Geophysical. Res.* – 1966. – Vol. 71. – P. 3665-3675.
4. Hogg E. L. Electron density of 8-100 electron Cu-3 detected from Agouti II high latitudes ion gens / E. L. Hogg // *Canadian Jour. Phys.* – 1967. – Vol. 45. – P. 27-35.
5. Experimental and Numerical studies on potential distributions in a plasma / N. Singh, R. Kist, H. Thiemann, L. P. Block // *Plasma Physics.* – 1980. – Vol. 22. – P. 695-707.
6. Незлин М. В. Неустойчивость пучков заряженных частиц в плазме / М. В. Незлин // *УФН.* – 1970. – Т. 102. – № 1. – С. 105-139.
7. Незлин М. В. О двойных слоях с виртуальным катодом в неустойчивостях системы пучок-плазма / М. В. Незлин // *Физика плазмы.* – 1981. – Т. 7. – № 5. – С. 1048-1054.
8. Torven S. Proportion of a fluctuating double Layer in a magnetized plasma column / S. Torven, L. Lindberg // *Journal. Phys.* – 1980. – Vol. 15. – P. 2285-2300.
9. Schweigert I. V. Active control of electron energy distribution function in dc discharge using an auxiliary electrode / I. V. Schweigert, V. I. Demidov, I. D. Kaganovich / *ESCAMPIG XXI Portugal.* – 2012. – No. 6. – 2 p.
10. Schweigert I. V., Kaganovich I.D., Demidov V.I. Active electron energy distribution function control in direct current discharge using an auxiliary electrode / I. V. Schweigert, I. D. Kaganovich, V. I. Demidov // *Phys. Plasmas.* – 2013. – Vol. 20. – No. 10. – p. 101606. DOI: 10.1063/1.4823465.
11. Modeling a short dc discharge with thermionic cathode and auxiliary anode / E. Bogdanov, V. I. Demidov, I. D. Kaganovich, M. E. Koepeke, A. A. Kudryavtsev // *Phys. Plasmas.* – 2013. – Vol. 20. – No. 10. – P. 101605. DOI: 10.1063/1.4823464.

### References

1. Block L. Acceleration of crucial particles by electric double Layer. *Earth's Magnetospheric Processes*, ed. B. M. McCormac. New York: Springer, 1972, pp. 258–267.
2. Block L. A double layer review. *Astrophysics. Space Sci.*, 1978, Vol. 55, pp. 59-83.
3. Calvert W. Steep Horizontal Electron- Density Gradients in the Topside P-Layer. *Journal. Geophysical. Res.*, 1966, Vol. 71, pp. 3665-3675.
4. Hogg E. L. Electron density of 8-100 electron Cu-3 detected from Agouti II high latitudes ion gens. *Canadian Jour. Phys.*, 1967, Vol. 45, pp. 27-35.
5. Singh N., Kist R., Thiemann H., Block L. P. Experimental and Numerical studies on potential distributions in a plasma. *Plasma Physics.*, 1980, Vol. 22, pp. 695-707.
6. Nezlin M. V. Neustojchivost' puchkov zaryazhennyh chastic v plazme. *UFN*, 1970, Vol. 102, No. 1, pp. 105-139.
7. Nezlin M. V. O dvojnnyh sloyah s virtual'nym katodom v neustojchivostyah sistemy puchok-plazma. *Fizika plazmy*, 1981, Vol. 7, No. 5, pp. 1048-1054.
8. Torven S., Lindberg L. Proportion of a fluctuating double Layer in a magnetized plasma column. *Journal. Phys.*, 1980, Vol. 15, pp. 2285-2300.
9. Schweigert I. V., Demidov V. I., Kaganovich I. D. Active control of electron energy distribution function in dc discharge using an auxiliary electrode. *ESCAMPIG XXI*, Viana do Castelo, Portugal, July 10-14, 2012, No. 6, 2 p.
10. ESCAMPIG XXI, Viana do Castelo, Portugal, July 10-14 2012.
11. Schweigert I. V., Kaganovich I.D., Demidov V.I. Active electron energy distribution function in direct current discharge using an auxiliary electrode. *Phys. Plasmas.*, 2013, Vol. 20, No. 10, pp. 101606. DOI: 10.1063/1.4823465.
12. Bogdanov E., Demidov V. I., Kaganovich I. D., Koepeke M. E., Kudryavtsev A. A. Modeling a short dc discharge with thermionic cathode and auxiliary anode. *Phys. Plasmas.*, 2013, Vol. 20, No. 10, pp. 101605. DOI: 10.1063/1.4823464.

Рецензія/Peer review : 16.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 12.12.2015 р.

## ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗРІЗНЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ВУЗЬКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ НОВИХ ПІДХОДІВ ЧАСТОТНО-ЧАСОВОЇ ВАГОВОЇ ОБРОБКИ

В даній статті розглядається питання застосування частотно-часової вагової обробки вузькосмугових фінитних нестационарних сигналів при реалізації алгоритмів їх узгодженої обробки. Досліджено можливість і запропоновано шлях реалізації узгодженої фільтрації сигналів, фазовий спектр яких є випадковим, що дає змогу досягти практично потенційних можливостей розрізнення.

Ключові слова: нелінійна частотна модуляція; спектр; стаціонарна фаза; радіус впливу; вейвлет, корелятор.

O. M. SHYNKARUK, I. I. CHESANOVSKYY

National academy of the State border service of Ukraine named after Bohdan Khmeltsky, Ukraine

D. O. LEVCHUNETS

Khmeltsky National University, Ukraine

## OPTIMIZATION OF BOTH IDENTIFYING ALGORITHMS AND DISTINGUISHING NON-STATIONARY NARROWBAND SIGNALS, THAT BASED ON MODERN TIME-FREQUENCY WEIGHTING APPROACHES

The use of time-frequency processing narrowband finite non-stationary signals in the implementation of coherent processing algorithms is shown in this report. The way to matched filtering implementation for signals with random phase response is proposed. It allows to reach for almost potential signals distinguishing

Keywords: nonlinear frequency modulation; spectrum; stationary phase; radius of influence; wavelet, correlator.

Перехід радіосистем на широкосмугові технології передачі дискретних повідомлень обумовили значний прогрес в питаннях підвищення енергетичної і частотної ефективності використання радіоресурсу. Проте, високі показники ефективності таких систем досягаються лише в умовах високої «завантаженості» радіоканалу, що притаманно тільки окремому класу телекомунікаційних і радіолокаційних систем, в інших випадках доцільність розширення смуги частот радіоканалу, є як правило, невиправданою і більш оптимальним варіантом є «вузькосмугові» варіанти побудови радіоканалу. Іншим випадком, при якому канал не може бути реалізований із застосуванням широкосмугових сигналів, є системи добування інформації, в яких корисна інформація представляє собою вузькосмуговий модулюючий процес зондуемого сигналу. В багатьох випадках, цей процес є детермінованим в обмеженій множині реалізацій і задача зводиться лише до правильного розрізнення наявної реалізації. Це типовий випадок локації (радіо, акусто, сейсмо), коли основна проблема на етапі обробки сигналів полягає в необхідності розрізнення сигналів, що слабо рознесені як в часі так і по частоті. Особливість цього випадку полягає в тому, що достеменно відомо про різну частотно-часову динаміку сигналів, яка обумовлена різними просторовими формами об'єктів зондування. Проте, в наслідок вузькосмуговості зондуемых сигналів і самих модулюючих фізичних ефектів, реалізувати цю особливість у вигляді узгодженого алгоритму практично неможливо. Розглянемо випадок, коли необхідно розрізнити дві реалізації обмеженого в часі сигналу, що модульований по частоті вузькосмуговим полігармонійним процесом

$$u(t) = U(t) \cos(\omega_0 t + \psi(t)), \quad (1)$$

де

$$U(t) = \begin{cases} const, & 0 \leq t \leq \tau_i \\ 0, & t < 0, t > \tau_i \end{cases}, \quad \psi(t) = \Delta\omega \int_0^t \sum_i u_i \sin(\Omega_i x + \varphi_i) dx,$$

$\tau_i$  - тривалість сигналу (імпульсу);  $\Delta\omega$  - девіація частоти.

Форми двох реалізацій сигналу (1) з різними комбінаціями початкових фаз  $\varphi_i$  в полігармонійному модулюючому коливанні приведені на рис. 1.

Така форма модулюючого коливання в задачах локації виникає в наслідок нелінійності фазочастотної характеристики ефективної розсіюючої поверхні об'єкта локації, що притаманно навіть елементарним формам поверхонь, особливо в резонансному діапазоні. При здійсненні частотної модуляції гармонійного коливання сигналами такої форми з невеликим значенням коефіцієнта модуляції, спектри сигналів, як це видно з рис. 2, практично не розрізняються, а отже вирішити задачу розрізнення таких сигналів достатньо важко.

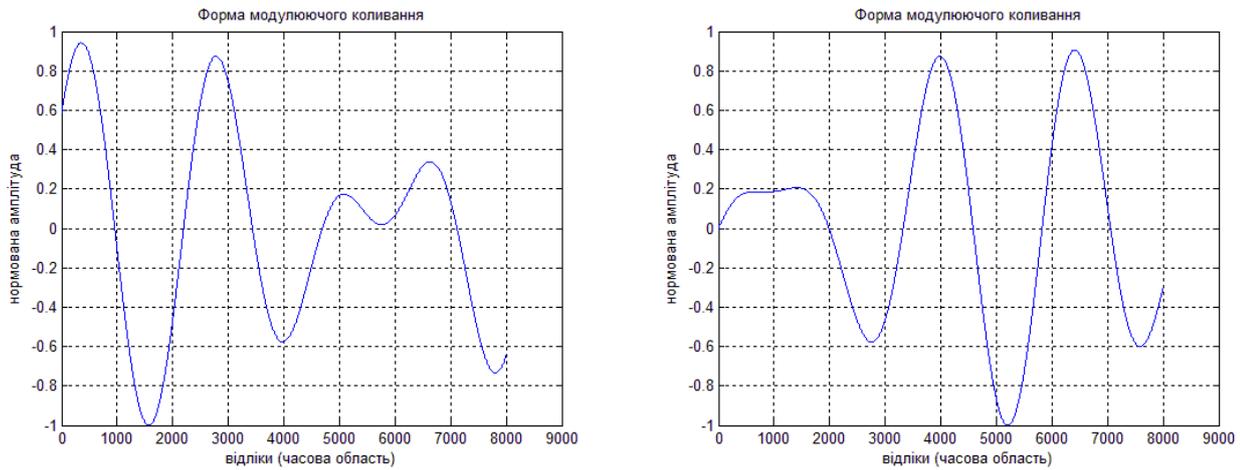


Рис. 1. Випадкові форми двох модулюючих полігармонійних коливань

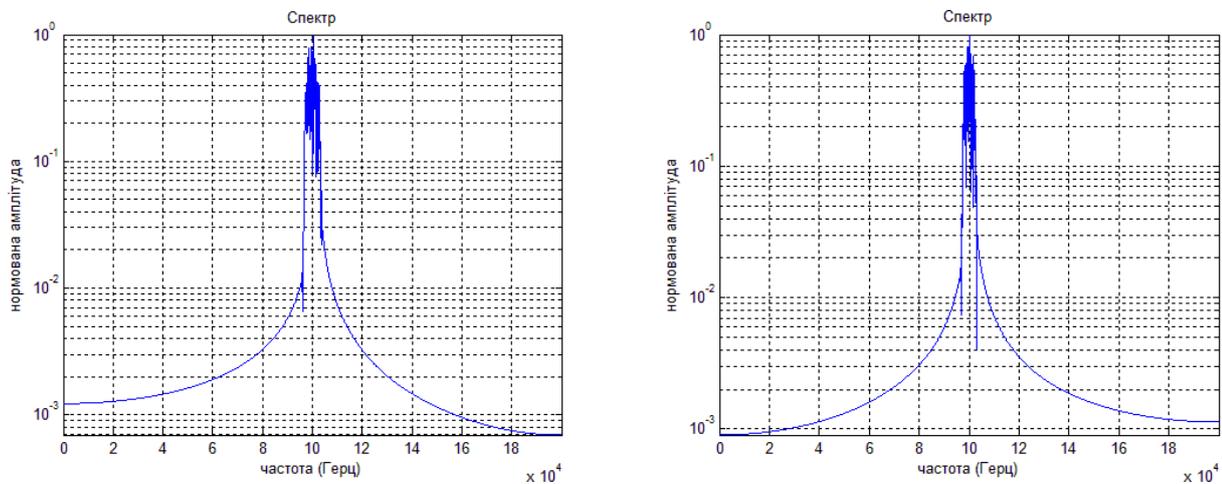


Рисунок 2 – Амплітудні спектри сигналів модульованих по частоті різними вузькосмуговими полігармонійними коливаннями

Проте, якщо виходити з інтуїтивних уявлень про частотну модуляцію і розглянути частотно-часову структуру спектрів сигналів (спектрограму), що показані на рис. 3, можна побачити, що навіть при грубій оцінці частотної динаміки вона достатньо чітко проглядається.

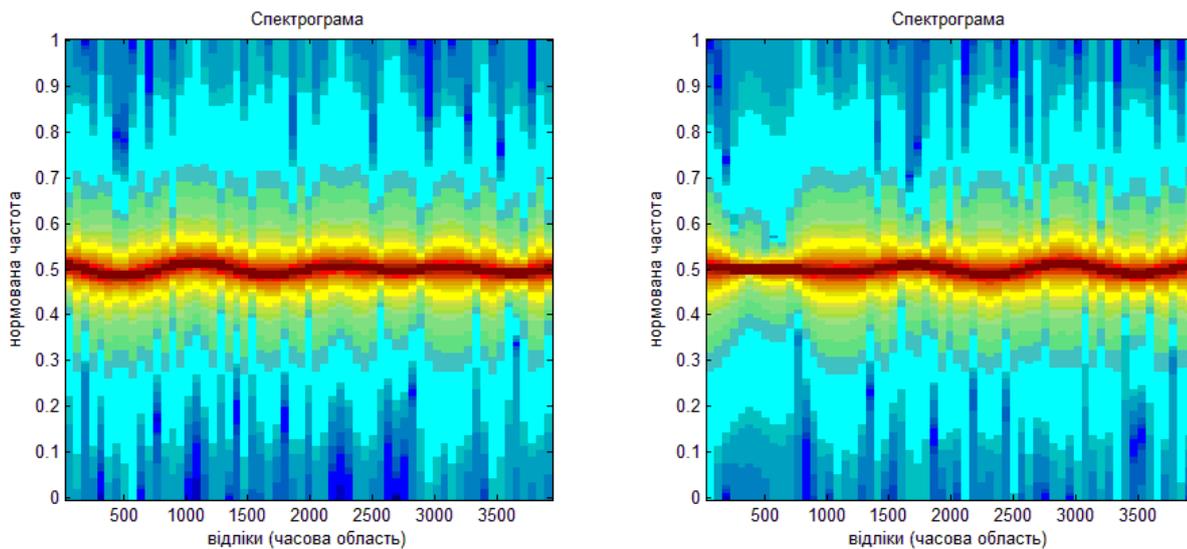


Рис. 3. Спектрограми двох реалізацій сигналів з полігармонійною частотною модуляцією при різних формах модулюючих коливань

З рис. 3, також видно, що в миттєвому (в сенсі вузького проміжку часу аналізу) спектрі сигналу присутня значна динаміка його локалізації, в залежності від форми модулюючого сигналу. Це створює передумови до застосування віконного або локальнобазисного підходів для більш ефективної обробки таких

сигналів за умови, що вікно в двовимірному просторі забезпечить оптимальну локалізацію і буде володіти динамічним «центром ваги».

В загальному випадку, частотно-часове представлення сигналу може бути виражене у вигляді

$$S(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} W(t - \tau)u(\tau)e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (2)$$

де  $W(x)$  - віконна функція, що забезпечує локалізацію сигналу в часовому вимірі.

Як показує практика застосування віконних спектральних перетворень, в задачах аналізу нестационарних вузькосмугових сигналів, при наявності навіть незначної частотної динаміки в сигналі, їх ефективність значно знижується, оскільки будь-яка деформація вагового вікна для відслідковування частотного тренду сигналу, призводить до спотворення частотного спектру самого вікна. При цьому, чим вища динаміка вікна, тим більші спотворення в його частотному спектрі і тим нижча ефективність обробки сигналу в цілому. З іншої сторони, застосування локальнобазисного перетворення, що фактично полягає в заміні ядра інтегрування  $W(t - \tau)e^{-j\omega\tau}$  певною фінітною функцією, яка при цьому характеризується ще й значною частотною локалізацією. Прикладом цього може бути вейвлет перетворення, яке цю задачу, як показує аналіз, також не вирішує, оскільки локалізація енергії сигналу відносно коефіцієнтів розкладання також є поганою, що видно з рис. 4.

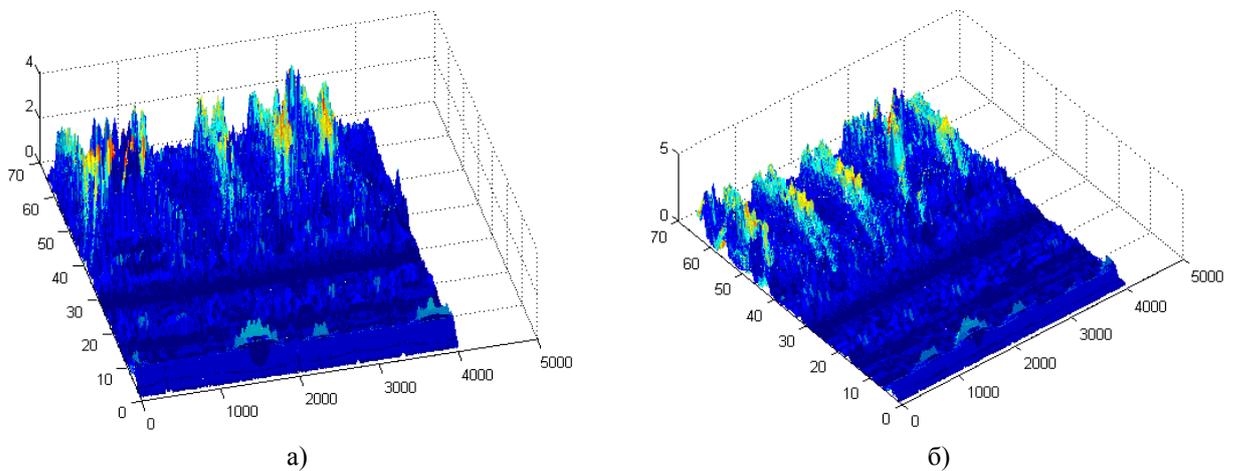


Рис. 4. Вейвлет перетворення сигналів з використанням вейвлету Шеннона (Shan) в першому (а) і другому випадках (б)

Проте, аналізуючи різні представлення цих двох сигналів, стає очевидною одна особливість, а саме, наявність зон де енергія сигналу концентрується значно вище ніж в інших місцях. Використовуючи цю особливість можна досягти значного виграшу від використання віконного (локальнобазисного) перетворення застосовуючи стаціонарні віконні функції в часові інтервали, де спектр сигналу максимально концентрується.

Структура пристрою, що реалізує даний підхід приведена на рис. 5.

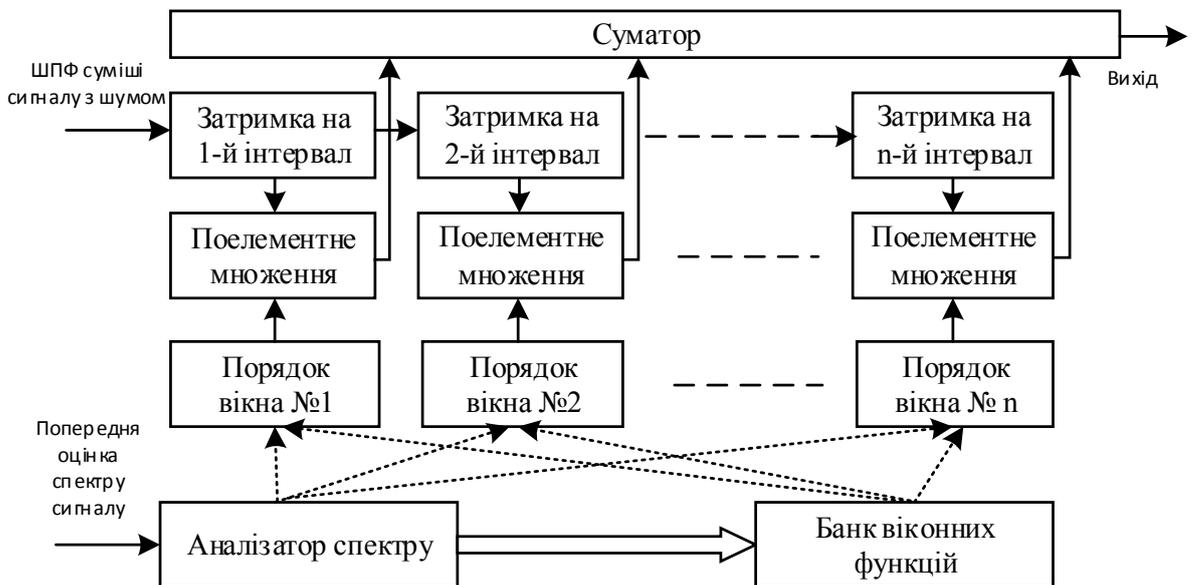


Рис. 5. Структурна схема пристрою частотно-часової обробки нестационарних сигналів

Ключовим моментом застосування даного підходу, є визначення необхідних часових затримок при позиціонуванні вагових вікон та визначення їх порядку. Для вирішення цієї задачі можна скористатись відомим підходом, що базується на асимптотичних методах наближеної спектральної оцінки сигналів – методом стаціонарної фази. Даний метод базується на застосуванні наближеної формули

$$G = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-p\varphi(x)} dx \approx \sqrt{\frac{2\pi}{p\varphi''(x_0)}} f(x_0)e^{-p\varphi(x_0)}, \quad (3)$$

яка дає змогу визначати спектральну щільність сигналу в «особливих» точках – так званих точках стаціонарної фази, в яких концентрація спектральної щільності найвища. Особливість даних точок полягає в тому, що в них відсутня динаміка повної фази сигналу, тобто

$$\frac{d}{dt}(\omega_0 t + \psi(t)) = 0. \quad (4)$$

А це означає, що саме в цих точках є сенс проводити вагову обробку спектру сигналу для потенційного підвищення ефективності алгоритму виявлення та розрізнення.

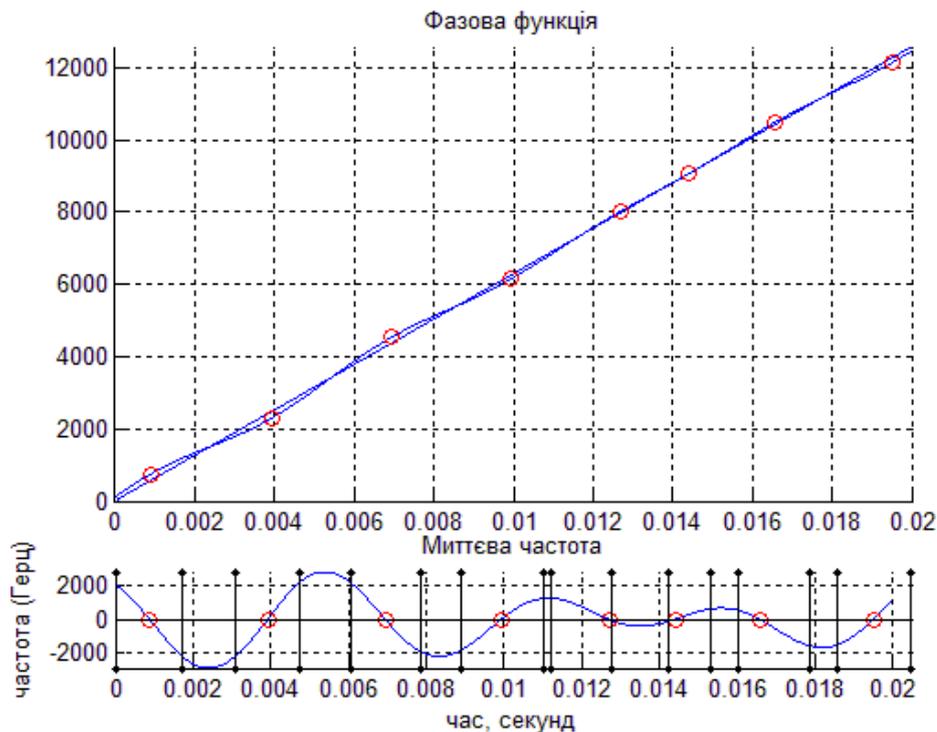


Рис. 6. Оцінка точок стаціонарної фази

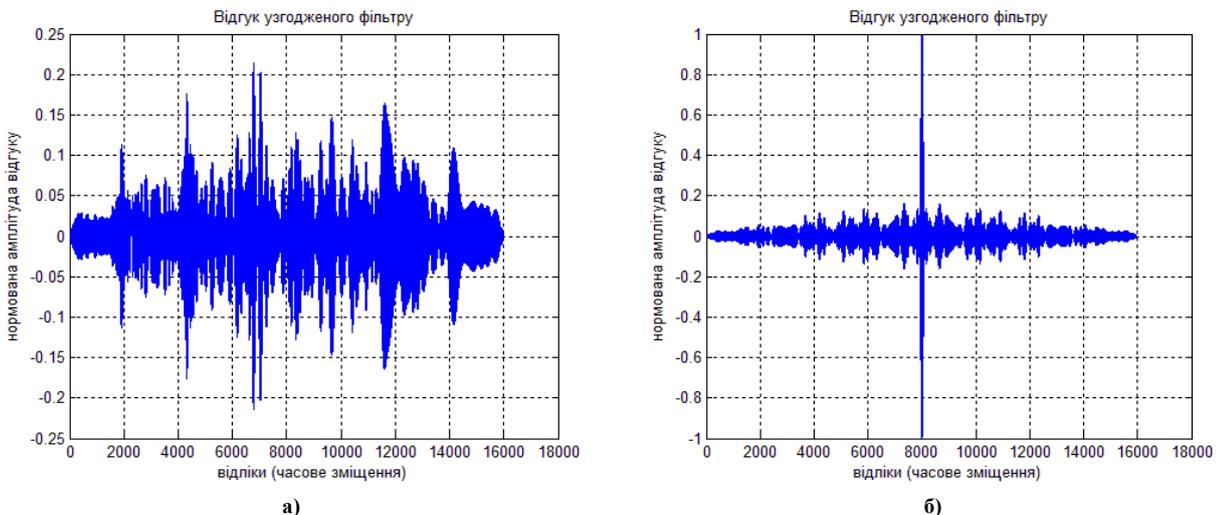


Рис. 7. Нормовані відгуки узгоджених фільтрів без застосування (а) і після застосування вагової обробки (б)

Часова локалізація вагових вікон (порядок вікна) визначається з радіусу впливу [1, 2] стаціонарної точки, що в фізичному розумінні є другою похідною від фазової функції. На рис. 6 приведено результати оцінки точок стаціонарної фази одного з сигналів. Як видно з рисунків, частотно-часова структура сигналів,

незважаючи на те що вони повністю перекриваються по частотній смузі, часовий розподіл спектральної концентрації у них сильно відрізняється. На рис. 7 приведено результати узгодженої фільтрації вузькосмугового сигналу із застосуванням і без застосування вагової обробки.

Як видно з отриманих рисунків, ефективність використання енергії сигналу (виходячи із оцінки основної пелюстки відгуку узгодженого фільтру) збільшується в декілька разів, що свідчить про дієвість запропонованого підходу.

Отримані результати дослідження показують ефективність застосування віконного (локальнобазисного) перетворення при побудові оптимальних алгоритмів обробки (виявлення та розрізнення) вузькосмугових сигналів. Як видно із результатів моделювання, застосування вагової обробки спектру сигналу лише в околицях стаціонарних точок дає змогу підвищити ефективність алгоритмів виявлення та розрізнення сигналів за рахунок їх обробки лише в інтервалах найбільшої частотної концентрації.

### Література

1. “Вопросы перспективной радиолокации”, Collective monograph. Edited by A. Соколов. – М.: Радиотехника, 2003 р., с. 512.
2. В. Кравченко, В. Рвачев, “Алгебра логики, атомарные функции и вейвлеты в физических приложениях”, М.: ФИЗМАЛИТ, 2006 р., с. 416.
3. В. Попов, “Исследование влияния боковых лепестков спектра окон на погрешности обработки и передачи сигнала”, М.: МГТУ, 2010 р., с. 203.
4. Л. Варакин, “Теория сложных сигналов” Советское радио. Москва, 1970 р., с. 376.
5. Ч. Кук, М. Бернфельд, “Radar signals” Советское радио. Москва, 1971 р., с. 567.
6. Кочемасов В. Н., Оконеchnikov В. С. Сжатие частотно-модулированных сигналов с небольшим произведением девиации частоты на длительность импульса // Зарубежная радиоэлектроника. 1987 р., № 1. с. 82-94.

### References

1. “Voprosy perspektivnoi radyolokatsyy”, Collective monograph. Edited by A. Sokolov. – М.: Radyotekhnika, 2003 y., pp. 512.
2. V. Kravchenko, V. Rvachev, “Algebra lohyky, atomarnye funktsyy y veivlety v fyzycheskykh prylozhenykh”, М.: FYZMALYT, 2006 y., pp. 416.
3. V. Popov, “Yssledovanye vlyianyia bokovykh lepestkov spektra okon na pohreshnosty obrabotky y peredachy syhnala”, М.: MHTU, 2010 y., p. 203.
4. L. Varakyn, “Teoryia slozhnykh syhnalov” Sovetskoe radyo. Moskva, 1970 y., pp. 376.
5. Ch. Kuk, M. Bernfeld, “Radar signals” Sovetskoe radyo. Moskva, 1971 y., pp. 567.
6. Kochemasov V. N., Okonechnykov V. S. Szhatye chastotno-modulyrovannykh syhnalov s nebolshym proyzvedenyem devyatsyy chastoty na dlytelnost ympulsa // Zarubezhnaia radyoelktronyka. 1987 y., # 1. pp. 82-94.

Рецензія/Peer review : 5.11.2015 р.

Надрукована/Printed :15.12.2015 р.

## PROVIDING ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF THE SECONDARY ELECTRICAL CIRCUITS OF NUCLEAR POWER PLANTS

*Problems of electromagnetic compatibility equipment for nuclear power industry is considered. The results of the impact of interference on the apparatus and equipment, methods of dealing with harmful effects, examples of the modernization of nuclear power plants and solutions for better noise immunity are presented.*

*Keywords: nuclear power plants, Instrumentation and Control systems (I&C), technical tools of automation (TTA), electrical and electromagnetic effects, quality power supply network, Electromagnetic compatibility (EMC).*

В.М. ЕВЛАНОВ, К.М. ЕФИМОВА

Государственный научно-технический центр ядерной и радиационной безопасности

С.И. АЗАРОВ

Институт ядерных исследований

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ВТОРИЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

*Рассматриваются проблемы электромагнитной совместимости оборудования для атомной энергетики. Представлены результаты воздействия помех на приборы и оборудование, методы борьбы с вредными эффектами, приведены примеры модернизации ядерных установок и решений для повышения помехоустойчивости.*

*Ключевые слова: АЭС, системы контроля и управления (СКУ), технические средства автоматизации (ТСА), электрические и электромагнитные факторы влияния, качество сети электропитания, электромагнитная совместимость (ЭМС).*

### 1. Introduction

Electromagnetic external factors include electromagnetic processes caused by work and / or problems with other technical tools of automation (TTA), the plant processing equipment as well as natural phenomena and personnel actions that degrade or may degrade the performance of TTA (hereinafter – the noise). TTA immunity requirements set in the general case, with respect to the following types of interference in accordance with: static electricity on the housing, controls and screens external cables; microsecond pulse interferences in the supply circuits; nanosecond pulse interference from external sources for information circuits and the supply circuits; exposure to radio frequency interference; dynamic changes in power supply voltage; magnetic fields of industrial frequency; pulsed magnetic fields; short sinusoidal interference in protective circuits and signal ground; microsecond pulse interference in protective circuits and signal ground. Depending on the class of security TTA and the electromagnetic environment in the place to accommodate a group of TTA establish noise immunity.

Influence of electromagnetic compatibility TTA is considered in two aspects:

- on the one hand, this malfunction TTA under the influence of interference;
- on the other - that TTA may themselves serve as sources of interference to other products including other TTA.

Noise immunity in the theory of transmission of electrical signals called a communication channel withstand interference. Among all the possible types of interference exclusive place and is so-called fluctuating noise such as "white noise", which is composed of very short pulses (duration 10-12 sec) with varying amplitude. White noise is a stationary random process, power spectral density is constant at all frequencies. According to theorem Winner-Khinich [1], the correlation function of white noise is delta-function. White noise is an abstract mathematical model and physically can not exist. This is primarily due to its infinite variance (average power). The occurrence of white noise is due to the thermal motion of elementary particles. White noise is the main noise determines the sensitivity of the receiver. Therefore, in theory, the transfer of information to simplify the analysis considers the impact of white noise, where the studied system bandwidth substantially narrower effective width of the noise spectrum on which it acts.

Literature [2], [3] and immunity requirements set in the general case, with respect to the following types of noise:

- static electricity on the body, controls and external cable screens;
- microsecond pulse interferences in the supply circuits;
- nanosecond pulse interference from external sources for information circuits and the supply circuits;
- exposure to radio frequency interference;
- dynamic changes in power supply voltage;
- power frequency magnetic fields;
- pulsed magnetic fields;

- short circuits in the sinusoidal interference shielding and signal ground;
- microsecond pulse interference in protective circuits and signal ground.

Value of EMC compliance can not be overestimated. Any object electricity (including nuclear power), has system of control and power, as well as instrumentation. The use of information technology, problem solving to increase nuclear capacity expansion of power supply systems leads to the increase in the influence of noise immunity apparatus and equipment of nuclear power. Due to the rapid development and use of microprocessor technology threshold level of electromagnetic interference, disrupt the normal functioning of the power equipment fell sharply. For example, the response time of electromechanical relays the old model and electronic equipment developed in 1950-1980, was about 20 ms, while the response time of modern digital equipment - about 0.2 ms (100 000 times less). Reducing the operating voltage relays from 110 to 5 Volt increased the susceptibility of modern digital equipment to high-frequency electromagnetic interference switching character, to magnetic and electric fields, microsecond pulse interferences of high energy. Additionally, the number of failures of electrical NPP is one of the largest in comparison to other systems, resulting in impaired or stop operation units.

The reasons for these failures are often non-compliance for immunity. This is not always correctly determined by the commission to investigate the causes of failure and can lead to repeated similar failures and accidents.

The purpose of this article - to provide information that may be useful operator personnel to consider the effect of noise in the secondary circuits, leading to false positives.

## 2. Fundamentals of signal noise immunity of equipment

### 2.1 General consideration

Consider the most characteristic effects of interference, resulting in false positives appartury. As an example, the effect of noise on the storage device and information processing (DSP) neutron flux monitoring system for the control room. When you receive on the input DSP from the detection units or pulsed current signal with interference is possible positives false alarm emergency and preventive protection.

It is well known [3] that the input reception device or the receiver (in this case – DSP) of any communication system is usually a mixture of the transmitted signal arrives  $S(t)$  and noise  $n(t)$  as:

$$x(t) = S(t) + n(t). \quad (1)$$

Wherein the signal  $S(t)$  is as a rule, complex oscillation comprising, aparts from the time  $t$ , a plurality of parameters: amplitude  $a$ , phase  $b$ , frequency  $c$  and etc.:

$$S(t) = f(a, b, c, \dots t). \quad (2)$$

One or a group of these parameters is used for transmitting information, and the task of the receiver is to determine (measure) parameters in these conditions interference of the interfering action. If this problem is solved well compared to other receivers, receiver called an optimum realizing optimum noise immunity ("ideal" receiver). Outstanding soviet scientist V. A. Kotelnikov [4] developed the theory of potential noise immunity, allowing to define the quality of any communication channels. Moreover, the potential noise immunity was first defined in terms of Gaussian noise. According to this theory, any data transmission system with a given ensemble of signals in specific noise immunity is of the utmost value, which can not be improved by improving the receiver (*potential immunity*).

Depending on the purpose of the communication system of the receiver task will be classified as follows:

### 2.2. Problem of signal detection.

The receiver determines whether its input signal (with noise), or only one interference and the signal is known in advance Fig. 1, Space within a given space (coordinate system -  $Z, \tau$ ) shows the vector signal  $S$ , which is superimposed on the noise vectors with different phases and amplitudes (at any given time is added to the vector signal is one of the vectors of interference). In Figure 1 are several interference vectors to show that the vector can be of any interference phase and value. If the signal  $S$  is absent at the receiver input, interference vectors originate from the origin (point 0).

To address the question of the presence or absence of signal at the receiver input all the space is divided into two subspaces: subspace and signal subspace interference. Depending on in which subspace enters the end of vector, the receiver performs decision on the presence or absence of a signal. Border subspaces will depend on the reliability of the test used in the reception. If under the influence of interference end summary vector enters the subspace interference occurs pass signal; if the end of the vector without the interference of the signal enters the signal subspace there is a false alarm.

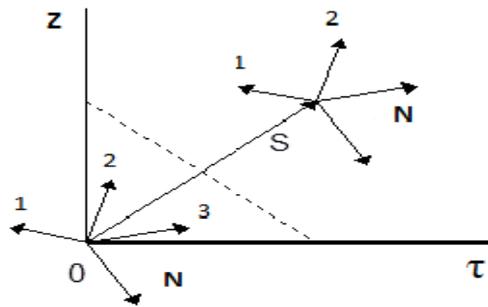
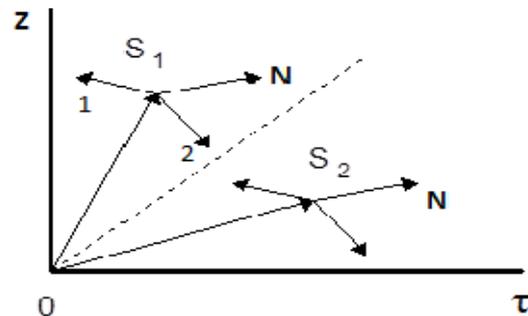


Fig 1. Detection signal interference.

### 2.3. Problem of distinguishing two signals (or n signals).

The receiver determines which of the signals ( $S_1$  or  $S_2$ ) has its input. Fig. 2 shows two vector signals together with interference. All interference signals and the space is divided into subspaces by the number of signals (in this case into two subspaces); receiver decides in favor of the signal in the subspace which is the end of the vector sum of the signal and noise. If under the influence of interference summary vector fall into someone else's subspace then error will occur.



It should be borne in mind that in a receiver for receiving digital signals (detection signals, discrimination of signals), the shape of the output signals, usually does not coincide with the shape of the signals at its input. For example, if the receiver discriminates the signals  $S_1(t) = A \cdot \cos \omega_1 t$  and  $S_2(t) = A \cdot \cos \omega_2 t$  (discrete frequency modulation), when receiving a signal  $S_1(t)$  at the receiver output will be positive polarity voltage pulse and when receiving the signal  $S_2(t)$  - a pulse of negative polarity (or zero, depending on the specific implementation of the receiver circuitry).

Fig 2. Differences between the two signals in noise

### 2.4. Parameter of the estimation signal

Carried out if the rate of change of the measured parameter signal is much less speed measurement (parameter value is not changed during the measurement).

### 2.5. Recovery of the transmitted signal

Carried out when receiving analog signals (filtering) and differs from the parameter estimation that the measured value is constantly changing during the measurement. From the foregoing, it is clear that the receiver is major unit (PY) (Fig. 3), which, in accordance with some rule  $\Phi(x)$  (**rule-solution**) find information parameter value (decides the output value  $y(t)$ , using the input signal  $x(t)$ ).

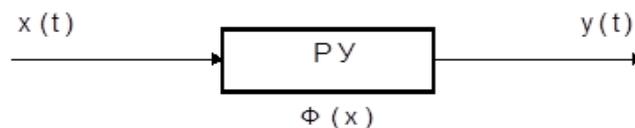


Fig. 3. Diagram of solver.

## 3. Statistical tests of optimal reception of digital signals.

### 3.1 Quality criterion

Quantitatively Immunity will determine some measure of conformity of the received message (signal). This measure (the measure of the quality of the decision) always determined by statistical and consumer communication (degree of sensitivity of the consumer to those or other distortions).

Optimum receiver (optimal decision rule) will provide the best quality solutions (minimum distortion of the sent message in accordance with the measure of the quality specified by the customer). The optimal value of quality measures, which is achieved by the receiver in the optimization process will be called **optimality criterion reception** (or just **quality criterion**).

Consider some of the most used methods of evaluating the noise immunity during transmission equipment of two signals  $S_1(t)$  and  $S_2(t)$ , as communication technology such problem frequently occurs. Note that when discriminating the error signal is required to occur at any of the signal power and interference because may be significant interference value. Fig. 4 shows transition graph in communication system when transmitting signals  $S_1(t)$  and  $S_2(t)$ . If the transmitted signal  $S_1$  and adopted  $y_1$  - means that the first signal is

received correctly. If transmitted signal  $S_1$ , and adopted  $y_2$ , when receiving the first signal is received instead of the second signal, an error has occurred.

Conditional probabilities  $P(y_1/S_1)$  and  $P(y_2/S_2)$  are the probability of correct reception of these signals.

There is no generally accepted criteria of noise immunity, so consider a few criteria for noise immunity in distinguishing signals. These criteria are actually different decision rule  $F(x)$ , based on specific customer requirements to the quality of reception for different purposes [5], [6].

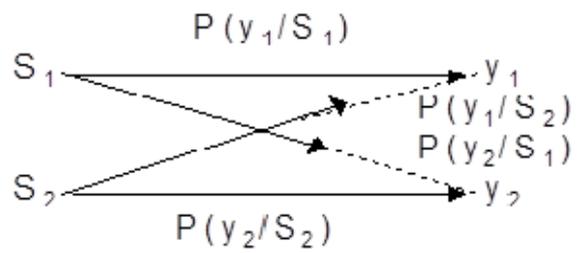


Fig. 4. Transition graph in a communication system.

**3.2 Criterion of minimum average risk (criterion  $R_{ma}$ ):**

When receiving digital signals as noise immunity is usually used average risk  $R_{ma}$ ; then the optimality criterion is  $\min \{R_{ma}\}$ .

The average risk can be defined by the formula:

$$R_{ma} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \Pi_{ij} P(S_i, y_j), \tag{3}$$

where:  $P(S_i, y_j)$ — joint probability of transmission  $S_i$  and receive  $y_j$ ;

$\Pi_{ij}$ —loss function(consumer's risk) when receiving  $y_j$ , where the signal  $S_i$ ; in this case  $i = j$  corresponds to the correct reception (values  $\Pi_{ij} = 0$ ),  $i \neq j$ —error (value  $\Pi_{ij} > 0$ );  $m$  — number of transmitted signals.

According to formula (3), this criterion for the two signals will minimize the average risk in the form of:

$$R_{ma} = \{ \Pi_{12} P(S_1, y_2) + \Pi_{21} P(S_2, y_1) = \Pi_{12} P(S_1) P(y_2/S_1) + \Pi_{21} P(S_2) P(y_1/S_2) \}. \tag{4}$$

Depending on the value of the loss function (in this case, the weighting coefficients  $\Pi_{12}$  and  $\Pi_{21}$ ), this criterion can be used in communication systems for various purposes, taking into account the losses that result from the distortion of signals  $S_1$  and  $S_2$ .

**3.3. Maximum likelihood criterion (criterion  $K_m$ ).**

$K_m$  criterion is obtained from the criterion of minimum average risk, if we assume that  $\Pi_{12} = 1/P(S_1)$ ,  $\Pi_{21} = 1/P(S_2)$ . When the receiver gets this optimum solution, so the value is minimized:

$$K_m = P(y_2/S_1) + P(y_1/S_2). \tag{5}$$

Criterion  $K_m$  will be called the criterion of minimum loss of information, since the optimal decision rule in this case establishes boundary subspace (Fig. 2) So, as to reduce the likelihood of distortion of the signal, which is less than the probability of transmission (hence the signal contains more information).

Maximum likelihood criterion used in communication systems and in those cases, where the prior probabilities  $P(S_1)$  and  $P(S_2)$  is unknown.

**3.4 Criterion ideal observer ( $K_{io}$ ).**

If the weighting coefficients  $\Pi_{12} = \Pi_{21} = 1$ , then the criterion of minimum average risk minimize the average probability of error:

$$K_{io} = P(S_1) P(y_2/S_1) + P(S_2) P(y_1/S_2), \tag{6}$$

and will be called the *ideal observer criterion*.

Criterion the ideal observer is widely used in communication systems when any signal distortion is equally undesirable.

**3.5 Neyman-Pearson criterion ( $K_{opt}$ ).**

In some communication systems there needed fixing (tasks) one of the conditional probabilities –  $P(y_1/S_2)$  or  $P(y_2/S_1)$ . Wherein the receiver decides an optimal manner to minimize the conditional probability, which is not specified. Optimality criterion, which is used in the receiver, called *Neyman-Pearson criterion*.

For example, given the probability of missing signal  $S_1$ ,  $P(y_2/S_1) = \alpha$ . Then Neyman-Pearson requires

minimizing the conditional probability  $P(y_1 / S_2)$ , providing a predetermined value  $\alpha$ . Probability  $P(y_1 / S_2)$  is usually denoted by  $\beta$ , then  $(1-\beta) = P(y_2 / S_2)$  is called **quality of solution**. Typically solutions the Neyman-Pearson provides  $\min \beta$  or  $\max (1 - \beta)$  at  $\alpha = const$ .

Receiver using criterion  $K_{opt}$  constructed so as to obtain sufficiently low probability of crossing signal (target)  $P(y_2 / S_1) = \alpha$ , so that in this case despite the minimization  $\beta = P(y_1 / S_2)$  may be a lot of false signals, which have to put up. This is the essence of this criterion  $K_{opt}$ .

**4. Concept of the likelihood ratio of discrete signal.**

Distinguishing signals in the receiving device generally carried establishing certain "threshold" at the output of the receiver and the actual boundary of the subspaces signals  $S_1$  and  $S_2$ .

Figure 5 shows some discrete signal  $S(t)$  (direct current pulses), which is superimposed on the fluctuating noise, and held the line corresponding to the selected threshold  $S_n$ . If  $S(t) < S_n$ , the receiver outputs a signal  $S_1$ , if  $S(t) > S_n$ , the receiver outputs a signal  $S_2$ . As can be seen from the figure, the time interval  $t_1, t_2$  under the influence of strong noise value  $S > S_n$ , in this case, the receiver may issue a signal  $S_2$ , although passed  $S_1$ .

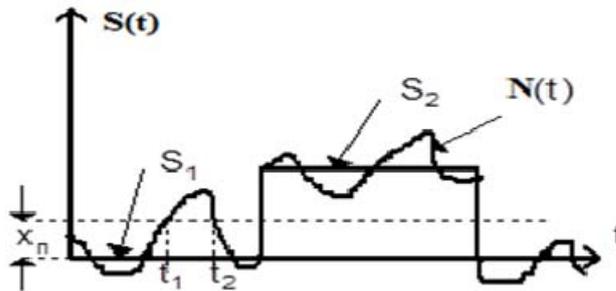


Fig.5 Change discrete signal depending on the interference.

Various criteria for reception of digital signals actually differ in the way of establishing the threshold. This problem is solved using the **likelihood ratio**.

If at the receiver there were no interference, we would be dealing with a "clean" signals  $S_1$  and  $S_2$  and the task of signal separation would be very simple. In the presence of interference signals are distorted, and their descriptions have to use a probability space. Signals together with interference signals already described by a probability density function  $w(x / S_1)$ , and  $w(x / S_2)$ , which are present in Fig. 6 (these functions are multiplied by the weighting coefficients as  $\Pi_{12}P(S_1)$  and  $\Pi_{21}P(S_2)$  and also shows the threshold  $x_n$ .

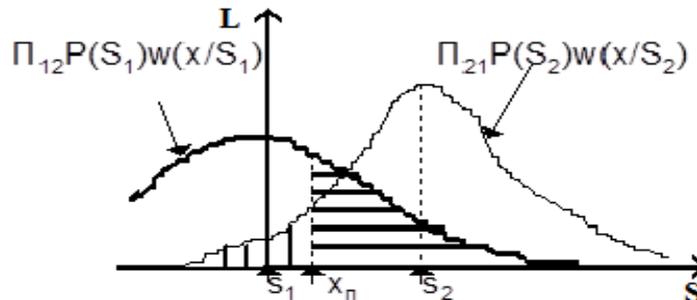


Figure 6. Probability density signal interference

Area of the shaded part of the figure to the left of  $x_n$  is equal to:

$$L = \int_{-\infty}^{x_n} \Pi_{21}P(S_2)w(x / S_2)dx, \tag{7}$$

and the shaded area to the right of the  $x_n$ :

$$L = \int_{x_n}^{+\infty} \Pi_{12}P(S_1)w(x / S_1)dx = \Pi_{12}P(S_1)P(x / S_1). \tag{8}$$

The sum of these values in accordance with the formula (3) is the average risk  $R_{ma}$ . Fig. 6 shows that  $R_{ma}$  will be minimal when the minimum total area under the curve, and this will be the case if  $x_n$  corresponds to the point

of intersection. Therefore, the condition for obtaining  $\min \{R_{ma}\}$  is threshold  $x_n$ , in where equality occurs ordinates of these curves:

$$\Pi_{12}P(S_1)P(x/S_1) = \Pi_{21}P(S_2)P(x/S_2), \quad (9)$$

which the following relations:

$$\lambda(x) = \frac{w(x/S_1)}{w(x/S_2)}. \quad (10)$$

Standing on the left in equation (10) will be called the **credibility ratio**.

The function  $w(x/S_i)$ , which represents the probability density that the received signal  $x$  is formed in the transmission signal  $S_i$ , the function will be called the **function of credibility** (function of credibility is also a function of any monotone  $w(x/S_i)$ , for example,  $\log [w(x/S_i)]$ ).

The greater the value of  $w(x/S_i)$ , more likely that  $x$  contains signal  $S_i$  (it is evident from Fig. 6). Standing right in (10), the expression will be called **threshold credibility**:

$$\lambda_0 = \frac{n_{21}m(S_2)}{n_{12}m(S_1)}. \quad (11)$$

It should be noted that the receiver using the credibility ratio, will work as follows:

- first, we analyze the incoming signal at its input and determine the likelihood ratio  $\lambda(x)$  (formula 10);
- from the known values of a priori probability  $P(S_1)$  and  $P(S_2)$ , and the specified weighting coefficients  $\Pi_{21}$  and  $\Pi_{12}$ , the threshold is determined by the credibility.
- value of  $\lambda(x)$  compared with  $\lambda_0$ . When: if  $\lambda(x) > \lambda_0$ , the receiver outputs a signal  $S_1$ , otherwise - the signal  $S_2$ .

## 5. Electromagnetic compatibility of equipment.

Consideration of the effects of all kinds of interference in the secondary electrical circuits of equipment in one article is hardly. Theoretical presentation of the phenomenon of false operation discussed above as the most frequent case disturbance on instrumentation. However, it should be noted that the interference effects can lead to more serious consequences. Electromagnetic compatibility described by the laws of probability, and hence when certain events may be subject to strong interference, simultaneous exposure to different kinds of obstacles on several electronic devices that have different meanings in the structure of the plant. Interference, under certain conditions, can not only reduce the quality of reception of information, but also to disable such items such as generators, electric motors, power transformers.

Directive of the European Parliament and the Council 2004/108 / EC provides that in the design and manufacture of equipment and instrumentation systems important for NPP safety and must be guaranteed to comply with the following requirements:- generated by electromagnetic interference should not exceed the level where the equipment can not be used for other purposes;- own immunity to electromagnetic interference should be sufficient to interference.

The requirements of Directive 2004/108 / EC states that the establishment of fixed installations must be applied techniques of good engineering practice and subject to such conditions, which ensure that after the commissioning the equipment will meet the requirements of electromagnetic compatibility. Such conditions should be formulated by component manufacturers in the accompanying documentation. For example, in September 2012 passed the acceptance tests of power supply manufacturer «BENNING GmbH & Co KG» (Germany), intended for delivery to the Khmelnytsky NPP. Representatives of the NAEC "Energoatom", the operating organization, State Nuclear Regulatory Committee was provided with detailed set of reports «Measurements regarding to IEC 61000», which contains data on the compliance of the manufactured equipment with international standards series 61000 EMC. The values of the parameters characterizing the influence of EMC in the report are presented in tabular and graphical form, and impact test, simulating interference, chosen with the most reserve of the possible (for the applied voltage, the number of entry points, ect.). This reserve is not required in terms of the normative document, but apparently made in view of the importance of understanding the impact of these effects on the equipment.

Note, the Ukrainian regulations [7-14] EMC after replacing GOST (General standards of Ukraine), given in accordance the series of standards IEC 61000. Description EMC- test methods are also contained in [6], methods of protection against interference and examples of modernization of equipment NPP - [15].

Singly consider EMC- test on site electrical products. The most common faults of the electrical products are short-circuit, insulation breakdown, deterioration of insulating properties, overheating of the contact group. Often incorrectly specify the reasons for these faults: moisture, reduction of resource, overvoltage fault of electricity supply company, violation of installation, the negligence of staff. As a result, in case of simple replacement of components (products), this defect may recur in the near future. Therefore, in cases where the exact cause of the

problem is the establishment of difficulty or failure repeats, although the above-mentioned reasons are eliminated, should be re-tested for immunity. The reasons for conducting such tests may be different: the exploitation of technical means, which are not set requirements for electromagnetic compatibility; low noise immunity and physical aging; designers and suppliers outside of Ukraine and others. As an example, almost complete replacement developed by the Moscow Institute "AEP" specifically for use in nuclear power plants and mass-produced in the USSR in Tbilisi plant "Elva" and Penza "Electromechanics" universal blocks of the technical means by production RPC "Radiy" (Kirovograd) and PJSC "SRPA "Impulse" (Severodonetsk) [16].

Noise immunity performance group, and hence the immunity test conditions, is determined according to the intended placement automation hardware. This involves monitoring of qualitative features (various grades) electromagnetic environment on a placement of TTA [2], as with the passage of time the integrity of the system grounding can disturb, shielding properties of the room can change, failure of the interference suppression devices is possible. Testing for immunity in the case of failure to eliminate the causes of deterioration of qualitative characteristics of electromagnetic environment, conducted in accordance with the really grade.

Electromagnetic environment at electric power facilities is a complex and difficult calculations, due to many cases it is determined experimentally. This includes developing special techniques and devices.

Directly in practice permissible levels of interference can be controlled by various technical measures. In summary, such activities include operating mode selection (for example, limiting short-circuit currents, voltage regulation, etc.), providing lightning protection, grounding, shielding, using protective devices that limit the overvoltage (for example, fuses, surge arresters, varistors, suppressor diodes, combined devices), filters, use of building structures as screens, rational location, etc. In order to eliminate deficits safety equipment including non-compliance with the regulations on noise immunity being modernized NPP. Examples include the modernization of the following I&C: control and protection system of the reactor (Unit 4 Rivne NNP, all power units South Ukraine NPP; 1-st and 2-nd power units Khmelnytsky NPP, 3-rd, 4-th and 5-th Zaporizhzhya NPP Units; control density and rate of change of the neutron flux at the 1-st, 2-nd, 3-rd, 4-th Unit Rivne NPP, 3-rd Unit South Ukraine NPP, 1-st, 2-nd Unit Khmelnytsky NPP; providing the security settings on the 3-rd power unit Rivne, South Ukraine NPP Units, the 1-st power unit Khmelnytsky NPP, all power units Zaporizhzhya NPP; control of the machine overload on Unit 4 of Rivne NPP, the 1-st, 2-nd South Ukraine NPP Units, 2-nd Unit Khmelnytsky NPP, 2-nd Unit Zaporizhzhya NPP).

Blocks harmonized set of technical means (UKTS) development and production of the 80-s have insufficient reliability, noise immunity, have hidden faults, under-diagnosed and also after prolonged storage came in partial or complete disrepair. Therefore, they are replaced with upgraded units UKTS, with sufficient depth self-test each unit. Separately, note that increasing application is use of fiber-optic lines as the method of dealing with electromagnetic interference.

Prerequisite to improve noise immunity is to use the element base of leading foreign companies - Motorola, Philips, Atmel and others. Ukrainian developers use highly reliable integrated circuits, capacitors, diodes, connectors, resistors, varistors. For example, in the devices of the power drive control logical part is made on the basis of microcontrollers from company Analog Devices, power on thyristor modules Eupec, diodes and transistors SEMIKRON. Widely used and high quality finished products - I&C components: servers and network switches Siemens Hewlett-Packard Co, monitors Samsung, uninterruptible power supplies - GE Digital Energy.

## Conclusions

Due to the introduction of information and control systems important to safety of nuclear facilities, increasing the influence of external electric and electromagnetic exposure factors. These factors can lead to serious accidents in the electrical equipment. Also notice, in the repair and replacement of the failed devices or their components are not always properly established, that the cause of failure can be precisely the impact of these factors. It leads to similar or more serious damage. Along with the calculation methods of improvement noise immunity apply proven universal practical solutions, introduced modern leading manufacturers.

Basic knowledge of the theory of noise immunity will allow operation personnel better understand the origin of the various types of interference, their impact on the useful signal, to calculate the maximum values of noise and, therefore, more correctly solve the problem of electromagnetic compatibility at the NPP. Normative documents on EMC in Ukraine are constantly being improved according to international standards. In cases low noise immunity of the equipment, its physical aging and failure to establish the exact cause malfunction, EMC-testing should be carried out not only in the factory and in specialized testing laboratories, but also on site installation of electrical equipment on the NPP.

## References

1. B. Sergienko. Digital signal processing / A.B. Sergienko. - Saint-Petersburg Ltd.: "Peter-Print", 2003. - 608 p., in Russian.
2. NP 306.5.02 / 3.035-2000. Requirements for Nuclear and Radiation Safety for instrumentation and control systems important to safety of nuclear power stations. - State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine, 28.03.2000 № 19, in Ukrainian.

3. Makarov A.A. The basis theory noise immunity of digital signals / A.A Makarov, L.A Chinenkov. - Novosibirsk: Sibgatov, 1997. – 41 p., in Russian.
4. Kotelnikov V.A. Theory of potential noise immunity / V.A Kotelnikov. - M.: Gosenergoizdat, 1956. – 153 p., in Russian.
5. Y. Rosen. EMC components and control systems (1): The rules of regulation and assessment of noise immunity // Nuclear and Radiation Safety / - К., 2007. - № 2. - pp. 9-26., in Russian.
6. Y. Rosen. Electromagnetic compatibility of components and control systems (2): resistance to electromagnetic interference // Nuclear and Radiation Safety/ - К., - 2008. - № 4. - pp. 58-76., in Russian.
7. DSTU IEC 61000-4-2:2008 Electromagnetic compatibility - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test., in in Ukrainian.
8. DSTU IEC 61000-4-2:2007 Electromagnetic compatibility - Part 4-3: Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test., in in Ukrainian.
9. DSTU IEC 61000-4-4:2008 Electromagnetic compatibility - Part 4-4: Testing and measurement techniques - Electrical fast transient/burst immunity test., in in Ukrainian.
10. DSTU IEC 61000-4-5:2008 Electromagnetic compatibility - Part 4-5: Testing and measurement techniques - Surge immunity test., in in Ukrainian.
11. DSTU IEC 61000-4-6:2007 Electromagnetic compatibility - Part 4-6: Testing and measurement techniques - Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields., in in Ukrainian.
12. DSTU IEC 61000-4-9:2007 Electromagnetic compatibility - Part 4: Testing and measurement techniques - Section 9: Pulse magnetic field immunity test., in Ukrainian.
13. DSTU IEC 61000-4-11:2007 Electromagnetic compatibility - Part 4-11: Testing and measurement techniques - Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests., in in Ukrainian.
14. DSTU IEC 61000-4-16:2007 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-16: Testing and measurement techniques - Test for immunity to conducted, common mode disturbances in the frequency range 0 Hz to 150 kHz., in in Ukrainian.
15. V. M. Yevlanov. Influence of electric and electromagnetic external influencing factors on the safety instrumentation and control systems important to safety NPP / VM Evlanov, KM Efimov // Nuclear and Radiation Safety - 2012. - № 2 (54). - С. - 30-35., in Russian.
16. Safety of nuclear power plants: Control and protection of nuclear reactor / M.A Yastrebenetsky, V. Rosen, S.V. Vinogradskaya etc .; Ed. M.A Yastrebenetsky. -К.: Base-Print, 2011. -764 p., in Russian.

## Література

1. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. — С.-Пб.: ООО «Питер-Принт», 2003. — 608 с.
2. НП 306.5.02/3.035-2000. Вимоги з ядерної та радіаційної безпеки до інформаційних і керуючих систем, важливих для безпеки атомних станцій. — Затвердж. наказом Держатомрегулювання України від 28.03.2000 № 19.
3. Макаров А. А. Основы теории помехоустойчивости дискретных сигналов / А. А. Макаров, Л. А. Чиненков. — Новосибирск: СибГАТИ, 1997. — 41с.
4. Котельников В. А. Теория потенциальной помехоустойчивости / В. А. Котельников. — М.: Госэнергоиздат, 1956. — 153с.
5. Розен Ю. В. Электромагнитная совместимость компонентов информационных и управляющих систем (1): Правила нормирования и оценки помехоустойчивости //Ядерная и радиационная безопасность / Ю. В. Розен. — К., 2007. — № 2. — С. 9—26.
6. Розен Ю.В. Электромагнитная совместимость компонентов информационных и управляющих систем (2): устойчивость к электромагнитным помехам / Ю. В. Розен // Ядерная та радіаційна безпека. — 2008. — № 4. — С. 58—76.
7. ДСТУ ІЕС 61000-4-2 :2008. Електромагнітна сумісність. — Ч. 4-2: Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості до електростатичних розрядів.
8. ДСТУ ІЕС 61000-4-3 :2007. Електромагнітна сумісність. — Ч. 4-3: Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості до радіочастотних електромагнітних полів випромінювання.
9. ДСТУ ІЕС 61000-4-4 :2008. Електромагнітна сумісність. — Ч. 4-4: Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості до швидких перехідних процесів пакетів імпульсів.
10. ДСТУ ІЕС 61000-4-5 :2008. Електромагнітна сумісність. — Ч. 4-5: Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості до сплесків напруги та струму (ІЕС 61000-4-5:2005, IDT).
11. ДСТУ ІЕС 61000-4-6: 2007. Електромагнітна сумісність. — Ч. 4-6. Методики випробування та вимірювання. Несприйнятливості до кондуктивних завод, індукованих радіочастотними полями.
12. ДСТУ ІЕС 61000-4-9:2007. Електромагнітна сумісність. Ч. 4-9: Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості до імпульсних магнітних полів.
13. ДСТУ ІЕС 61000-4-11: 2007. Електромагнітна сумісність. — Ч. 4-11: Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості до провалів напруги, коротких переривань та змінень напруги.
14. ДСТУ ІЕС 61000-4-16 :2007. Електромагнітна сумісність. — Ч. 4-16: Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості до кондуктивних несиметричних завод у діапазоні частот від 0 Гц до 150 кГц.
15. Евланов В. М. Влияние электрических и электромагнитных внешних воздействующих факторов на безопасность информационных и управляющих систем, важных для безопасности АЭС / В. М. Евланов, К. М. Ефимова // Ядерная та радіаційна безпека. — 2012. — № 2(54). — С. — 30—35.
16. Безопасность атомных станций: Системы управления и защиты ядерных реакторов / М. А. Ястребенецкий, Ю. В. Розен, С. В. Виноградская и др.; Под ред. М. А. Ястребенецкого. —К.: Основа-Принт, 2011. —764 с.

Рецензія/Peer review : 5.11.2015 р.

Надрукована/Printed :13.12.2015 р.

## НОВІ МЕТОДИ ПОБУДОВИ КЕРОВАНИХ ІМПУЛЬСНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ВИХОДОМ НА ЗМІННОМУ СТРУМІ

В цій статті на основі аналізу існуючих методів побудови керованих імпульсних джерел електроживлення з виходом на змінному струмі запропоновано нову топологію таких джерел, яка базується на використанні високочастотних магнітних підсилювачів в ролі силових комутаційних елементів. Зроблено порівняння з існуючими аналогами. Приведено функціональну схему силових частини запропонованого керованого джерела електроживлення та описано принцип її роботи.

Ключові слова: кероване імпульсне джерело електроживлення, високочастотний магнітний підсилювач, схема керування, широтно-імпульсна модуляція

V. I. YASKIV

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

### NEW METHODS OF DESIGN OF CONTROLLED AC SWITCH MODE POWER SUPPLIES

*Abstract – The aim of the research is creation of methods of design of controlled switch mode power supplies with ac output with an opportunity to provide a wide range of variation of their main parameters (power, frequency, amplitude).*

*In this paper, based on analysis of existing methods of design of controlled switch mode power supplies with ac output, a new topology of such power supply is suggested. It is based on the use of high-frequency magnetic amplifiers as switching elements. A comparison with existing analogues was made. The power circuit functional scheme of the suggested switch mode power supply is shown. Its principles of operation are described.*

*The suggested method can be used for design of uninterruptable power supplies with high output voltage quality, high power (hundreds watts – few kilowatts) electric drive systems with frequency regulation, in alternative energy.*

*Keywords: controlled switch mode power supply, high-frequency magnetic amplifier, control circuit, pulse width modulation*

### Вступ

На сьогоднішній день значна частина електроенергії споживається радіоелектронною апаратурою, системами та комплексами автоматики і телемеханіки, засобами радіозв'язку тощо. Часто вимоги до джерел живлення вказаних споживачів включають в себе не лише забезпечення постійних напруг певного рівня, але і змінних, не лише стабілізацію напруги, але й керування нею, а також можливість зміни вихідних характеристик самого джерела.

Найбільша потреба в керованих джерелах електроживлення із виходом на змінному струмі виникає при побудові регульованих електроприводів та систем безперебійного електроживлення. Питання удосконалення джерел електроживлення – їх енергетичних, надійнісних, питомих масо-габаритних показників - завжди були, є і будуть актуальними.

### Основна частина

Створення нових технологій, матеріалів, компонентів приводять до можливості побудови джерел живлення по принципово нових схемних і структурних рішеннях [1].

Найпростіший реалізації пристрою, який виконує задані функції, відповідає структурна схема, що зображена на рис.1.

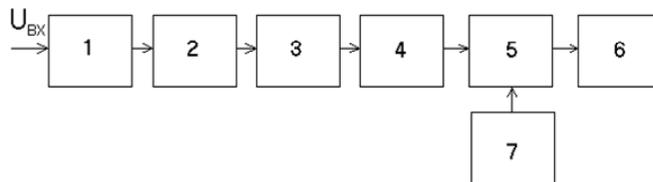


Рис.1. Структурна схема лінійного керованого джерела живлення з виходом на змінному струмі (1 - трансформатор, 2 - випрямляч, 3 - фільтр, 4 - стабілізатор, 5 - регулюючі елементи, 6 - навантаження, 7 - схема керування)

Регулюючі елементи (РЕ) 5 можна вмикати по мостовій, півмостовій схемі та по схемі із середньою точкою.

Переваги такої структури наступні - простота схемотехніки, висока точність, високі динамічні показники, великий досвід проектування таких систем.

Проте їй властиві наступні недоліки - низький ККД, незадовільні масо-габаритні показники, проблематичне забезпечення температурних режимів. Це зумовлене тим, що РЕ працюють в активному режимі. В теперішній час така топологія знаходить застосування лише для малопотужних споживачів.

Перспективнішим є використання регулюючих елементів у ключовому режимі (режимі класу D) з використанням широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Даній реалізації відповідає структурна схема,

зображена на рис. 2.

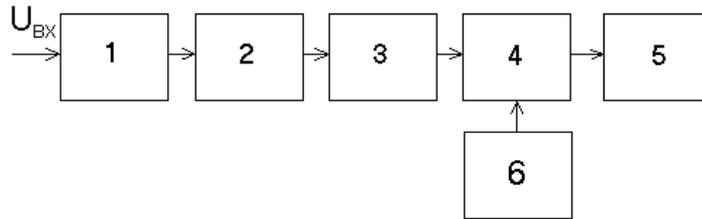


Рис. 2. Функціональна схема класичного імпульсного керovanого джерела живлення з виходом на змінному струмі (1 - високочастотний стабілізований перетворювач, 2 - випрямляч, 3 - фільтр, 4 - регулюючі елементи, 5 - навантаження, 6 - схема керування регулюючими елементами)

Як і в попередньому випадку, РЕ ввімкнуті по схемі моста, півмоста чи по схемі із середньою точкою, однак керуються вони комбінованим широтно-частотно-імпульсним модулятором. Вигляд напруги на навантаженні подано на рис.3.

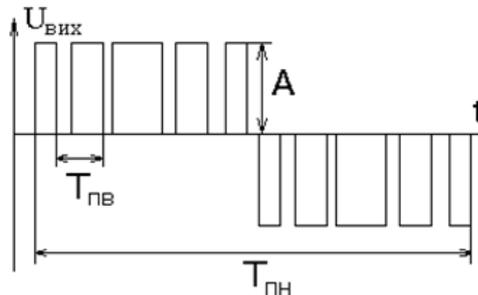


Рис. 3. Форма напруги при комбінованій широтно-частотно-імпульсній модуляції (A – амплітуда вихідної напруги,  $T_{ПВ}$  – період ШІМ,  $T_{ПН}$  – період частотної модуляції)

Переваги такої структури наступні - задовільний ККД, мала маса, малі габарити.

Притаманні їй недоліки – складне керування регулюючими елементами, порівняно високі динамічні втрати в регулюючих елементах, які ростуть пропорційно частоті ШІМ.

Щоб позбутися вказаних недоліків, використовують пристрої, збудовані за структурною схемою, зображеною на рис. 4:

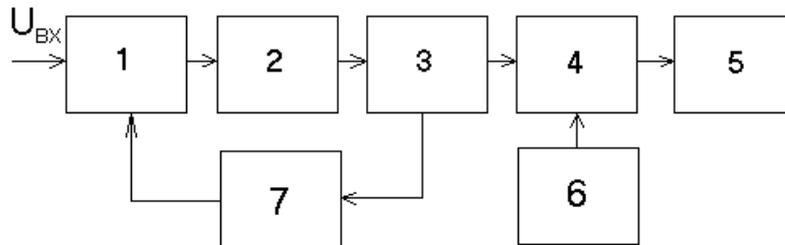


Рис. 4. Функціональна схема імпульсного керovanого джерела живлення з виходом на змінному струмі (1 - регульований високочастотний перетворювач, 2 - випрямляч, 3 - фільтр, 4 - регулюючі елементи, 5 - навантаження, 6 - схема керування регулюючими елементами з ЧМ, 7 - схема керування регульованим високочастотним перетворювачем з ШІМ)

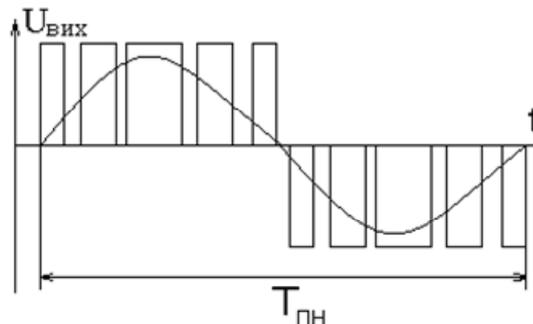


Рис. 5. Форма відфільтрованої напруги на виході джерела живлення

Напруга на навантаженні матиме вигляд, зображений на рис.5. Тут регульований високочастотний перетворювач (РВП) формує вихідну напругу по закону ШІМ, а полярність змінюється регулюючими

елементами по закону частотної модуляції (ЧМ).

Недоліки у порівнянні з попередньою структурою:

- у випадку  $N$  фаз необхідне  $N$ -кратне дублювання складових.
- динаміка схеми погіршується, оскільки коло зворотнього зв'язку охоплює ключові елементи РВП, його трансформатор, випрямляч та фільтр.

Зважаючи на вищевказане, найраціональнішою була б структура, зображена на рис. 6.

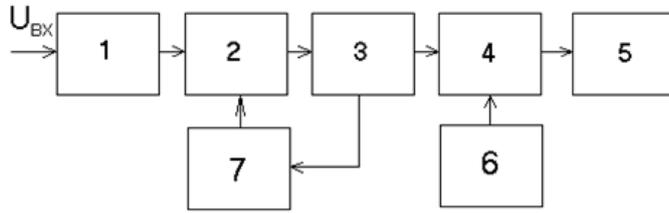


Рис. 6. Пропонована структурна схема імпульсного керованого джерела живлення з виходом на змінному струмі (1 - високочастотний нерегульований перетворювач, 2 - синхронний випрямляч, 3 - фільтр, 4 - регулюючі елементи, 5 - навантаження, 6 - схема керування регулюючими елементами з ЧМ, 7 - схема керування синхронним випрямлячем з ШІМ)

Динаміка такої системи є вищою, ніж у попередньому випадку за рахунок виключення з кола зворотного зв'язку високочастотного силового трансформатора та ключових елементів високочастотного перетворювача. Керування ключовими елементами спрощується, а також полегшується режим їх роботи.

Однак реалізація даної схеми сучасними способами досить складна. В першу чергу це обумовлено використанням в ролі синхронного випрямляча напівпровідникових елементів [2].

Пропонується як силові комутаційні елементи в керованих імпульсних джерелах електроживлення використати високочастотні магнітні підсилювачі. Це по суті дроселі насичення з осердям з магнітом'якого аморфного сплаву з прямокутною петлею гістерезису. Такого роду магнітний ключ у поєднанні з випрямним діодом та колом розмагнічування утворює синхронний випрямляч, схема керування яким містить лише 1-2 активні елементи. Широтно-імпульсна модуляція в такому силовому комутаційному елементі досягається за рахунок регулювання співвідношення насиченого і ненасиченого його станів шляхом зміни глибини розмагнічення його осердя у функції контрольованих параметрів чи заданого закону регулювання. Принцип його роботи, аналіз процесів в стабілізаторі на його основі, їх порівняльний аналіз з транзисторними розглянуті в літературі [3-6].

На рис. 7 приведено функціональну схему силовій частині керованого джерела живлення із застосуванням високочастотних магнітних підсилювачів [7].

Нерегульований перетворювач 1 подає високочастотну змінну напругу на трансформатор TV. Регулятори на дроселях насичення TS1 і TS2 (TS3, TS4) забезпечують стабілізацію постійної додатньої (від'ємної) напруги шляхом широтно-імпульсної модуляції у відповідності із задаючим сигналом. Ключі VT1, VT2 комутують різнополярну напругу в протифазі. При цьому на навантаженні отримуємо змінну напругу, частота якої визначається частотою керуючих сигналів  $U_1$ ,  $U_2$ .

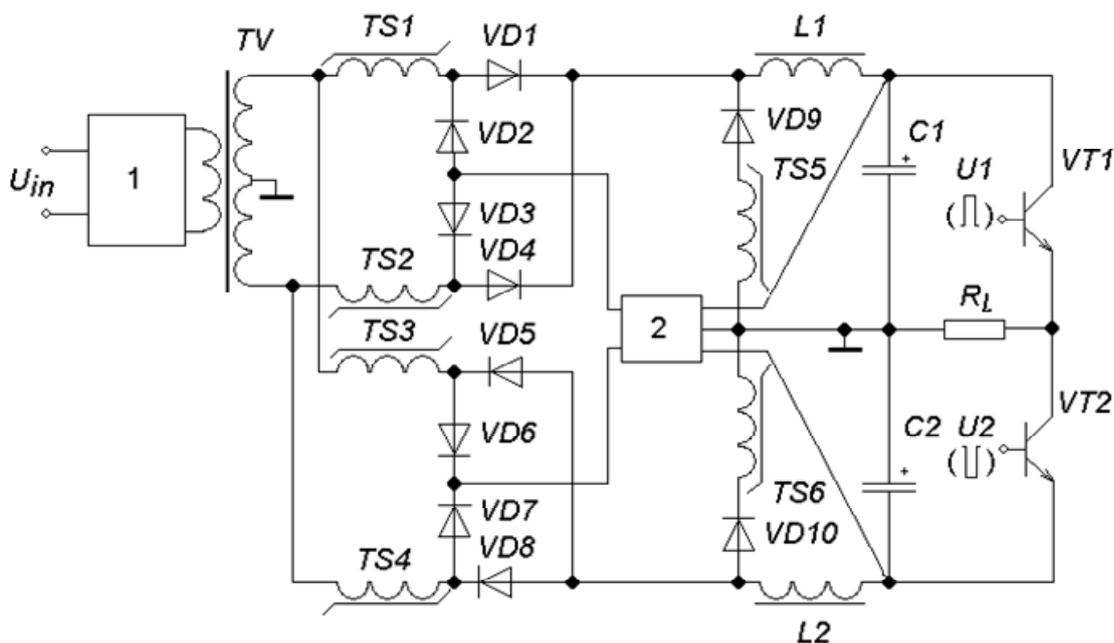


Рис. 7. Функціональна схема силовій частині керованого джерела живлення (1 - нерегульований високочастотний перетворювач, 2 - схема керування)

Кероване джерело електроживлення з виходом на змінному струмі працює наступним чином: у

від'ємний півперіод для дроселя насичення TS1 (TS4) має місце так званий півперіод керування. В цей проміжок часу діод VD1 (VD8) закритий, діод VD2 (VD7) відкритий і створюється коло для протікання струму через схему керування 2, розмагнічуючий діод VD2 (VD7) і дросель насичення TS1 (TS4). Під дією цього струму відбувається розмагнічення матеріалу дроселя насичення TS1 (TS4) від рівня індукції насичення  $B_s$  до якогось рівня  $B_1$ . Глибина розмагнічення регулюється схемою керування 2 у функції вихідної напруги. При зміні полярності вхідної напруги перемагнічування починається із запам'ятованого рівня індукції  $B_1$ . Коли для дроселя насичення TS2 (TS3) має місце півперіод керування, для дроселя насичення TS1 (TS4) має місце інший режим – робочий півперіод. У цьому випадку розмагнічуючий діод VD2 (VD7) закритий, діод VD1 (VD8) відкритий і джерело вхідної високочастотної змінної напруги через дросель насичення TS1 (TS4) та діод VD1 (VD8) під'єднане до навантаження. Робочий півперіод складається з двох етапів. На першому етапі відбувається перемагнічення дроселя насичення TS1 (TS4) від якогось запам'ятованого рівня індукції  $B_2$  до індукції насичення  $B_s$ . Час цього перемагнічування є значно менший, ніж час розмагнічування у півперіод керування за рахунок відсутності обмеження швидкості перемагнічування (опір навантаження на порядки менший за еквівалентний опір кола керування). Тому насичення дроселя досягається в межах півперіоду частоти вхідної змінної напруги. Після досягнення насичення дросель має практично нульовий опір (активний опір обмотки дроселя) і струм в колі обмежується лише опором навантаження (другий етап). В результаті формується різнополярна напруга на виході схеми. Комутація напруги на навантаженні здійснюється ключами VT1, VT2, які задають необхідну частоту вихідної змінної напруги.

Пропонований метод дозволяє отримати вихідну змінну напругу на навантаженні від нуля до десятків кілогерц. Його стабілізація здійснюється магнітними ключами на високій частоті (50-200 кГц). Відпрацювання збурення здійснюється за півперіод цієї частоти комутації, оскільки магнітний ключ є безінерційною ланкою із запізненням на півперіода цієї частоти. Тим самим забезпечується високий рівень динамічних характеристик [8].

В порівнянні з існуючими така топологія володіє цілим рядом переваг: вищий рівень надійності, що властиво магнітним елементам; реалізація закону керування магнітним шляхом, що значно розширює можливості регулювання; можливість отримання на виході сигналу в широкому діапазоні зміни основних його характеристик (потужності, частоти, амплітуди) з високими показниками якості; високий рівень динамічних характеристик; низький рівень випромінюваних електромагнітних завад [9,10]; високий ККД (> 95%); всі відомі переваги пристроїв перетворювальної техніки на основі високочастотних магнітних підсилювачів [5,6].

### Висновки

Запропонований метод побудови керованих джерел електроживлення на основі використання високочастотних магнітних підсилювачів може бути використаний при побудові джерел безперебійного електроживлення з високою якістю вихідної змінної напруги, систем прецизійного електроприводу невеликої потужності (сотні ват – одиниці кіловат) з частотним регулюванням, в альтернативній енергетиці, що забезпечать їм якісно новий рівень експлуатаційних характеристик – якості вихідної напруги (максимально відтворює синусоїду, за рівнем динамічних характеристик аналогів не існує), надійності, ціни (в рази дешевші за аналоги), ефективності, питомих показників тощо.

### Література

1. Миловзоров В.П., Мусолин А.К. Дискретные стабилизаторы и формирователи напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.: ил.
2. Функциональные устройства систем электропитания наземной РЭА. Под редакцией В.Г. Костикова. - М.: Радио и связь, 1990. – 192 с.: ил.
3. K. Harada, T. Nabeshima, "Applications of magnetic amplifiers to high-frequency dc-to-dcconverters," Proc. of the IEEE, 1988, vol. 76, N. 4, p. 355-361.
4. Яськів В.І. Математична модель імпульсного стабілізатора напруги на магнітних ключах. Технічна електродинаміка, №6, 2002.
5. Яськів В.І. Нові методи розробки імпульсних джерел вторинного електроживлення засобів комп'ютерної техніки. Теоретична електротехніка. Національний університет "Львівська політехніка", №56, 2002.- 135-141с.
6. V. Yaskiv, "Using of High-Frequency Magnetic Amplifier in Switch Mode DC Power Supplies," Proceedings of the 35th Annual IEEE Power Electronic Specialists Conference (PESC'04), Aachen, 2004, — p. 1658–1662.
7. Патент України №74199. Кероване джерело електроживлення з виходом на змінному струмі // Яськів В.І., Гурник О.П. -Опубл. в Бюл.№11, 2005.
8. Яськів В. І., Юрченко М. М., Гурник О. П. Експериментальне дослідження динамічних характеристик напівпровідникових перетворювачів електроенергії з високочастотними магнітними підсилювачами. Технічна електродинаміка (Тематичний випуск «Силова електроніка та

енергоєфективність»), 2005. -ч. 4,с. 7–9.

9. V.Yaskiv, A.Abramovitz, K.Smedley, “MagAmp Power Converters with Low Level EMI,” XII International Conference “The Experience of designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2013)”, Lviv Polytechnic National University, 19-23 February, 2013, Polyana-Svalyava (Zakarpattya), UKRAINE, p.388-395.

10. V.Yaskiv, A.Abramovitz, K.Smedley, A.Yaskiv, “MagAmp Regulated Isolated AC-DC Converter with High Power Factor,” special issue of journal COMMUNICATIONS - Scientific Letters of the University of Zilina, ISSN 1335-4205, No. 1A/2015, p. 28-34.

#### References

1. V. P. Milovzorov, A. K. Musolin, Diskretnye stabilizatori i formirovateli napryazheniya, M.: Energoatomizdat, 1986.
2. Funkcionalnie ustrojstva system elektropitaniya nazemnoj REA. Podredakciej V. G. Kostikova, M.: Radio i svyaz, 1990.
3. K. Harada, T. Nabeshima, “Applications of magnetic amplifiers to high-frequency dc-to-dc converters,” Proc. of the IEEE, 1988, vol. 76, N. 4, p. 355-361.
4. V. I. Yaskiv, “Matematychna model impulsnogo stabilizatora napruhy n amagnitnyh kluchah,” Tehnichna elektrodynamika, №6, 2002.
5. V. I. Yaskiv, “Novi metody rozrobky impulsnyh dzherel vtorynogo elektrozhvylnnia zasobiv kompyuternoї tehniky,” Teoretychna elektrotehnika, Natsionalnyi universytet “Lvivska politehnika,” №56, 2002, 135-141s.
6. V.Yaskiv, “Using of High-Frequency Magnetic Amplifier in Switch Mode DC Power Supplies,” Proceedings of the 35th Annual IEEE Power Electronic Specialists Conference (PESC’04), Aachen, 2004, — p. 1658–1662.
7. Patent Ukrainy #74199. Kerovane dzherelo elektrozhvylnnia z vyhodom na zminnomu strumi// V. I. Yaskiv, O. P. Gurnik. - Opubl.v Biul. #11, 2005.
8. V. I. Yaskiv, M. M. Yurchenko, O. P. Gurnik, “Eksperymentalne doslidzhennia dynamichnyh charakterystyk napivprovodnykovykh peretvoriuvachiv elektroenergii z vysokochastotnymy magnitnymy pidlyuvachamy,” Tehnichna elektrodynamika (Tematychnyi vypusk “Sylova elektronika ta energoefektyvnist”), 2005, ch. 4, s. 7–9.
9. V. Yaskiv, A. Abramovitz, K. Smedley, “MagAmp Power Converters with Low Level EMI,” XII International Conference “The Experience of designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2013)”, Lviv Polytechnic National University, 19-23 February, 2013, Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine, p.388-395.
10. V. Yaskiv, A. Abramovitz, K. Smedley, A. Yaskiv, “MagAmp Regulated Isolated AC-DC Converter with High Power Factor,” special issue of journal COMMUNICATIONS - Scientific Letters of the University of Zilina, ISSN 1335-4205, No. 1A/2015, p. 28-34.

Рецензія/Peer review : 9.12.2015 р.

Надрукована/Printed : 19.12.2015 р.

Рецензент: д. т. н., професор Євтух П. С.

**УДК 621.317.322**

**А.В. РУДИК**

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

## ФАЗОЧАСТОТНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ АМПЛІТУДИ ЗМІННОЇ НАПРУГИ СИНУСОЇДАЛЬНОЇ ФОРМИ

*Амплітуда змінної напруги синусоїдальної форми може бути перетворена в часовий інтервал, що визначається моментами переходу гармонічного сигналу через фіксовані рівні. Запропоновано вдосконалений фазочастотний метод вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми. Показано використання даного методу для реалізації багатоканальних вимірювачів (при використанні декількох опорних напруг) та для вимірювання відношення амплітуд змінних напруг синусоїдальної форми. Похибка розроблених вимірювачів визначається переважно точністю вимірювання або перетворення часових інтервалів.*

*Ключові слова: амплітуда змінної напруги синусоїдальної форми, фазочастотний метод вимірювання, опорна напруга, відношення амплітуд, похибка вимірювання.*

A.V. RUDYK

National University of Water and Environment Management, Rivne, Ukraine

### PHASE – FREQUENCY METHOD MEASURE THE AMPLITUDE SINUSOIDAL ALTERNATING VOLTAGE

*Abstract – The aim of this work is to improve the phase-frequency method of measuring the amplitude sinusoidal alternating voltage (with the possibility of using it to measure the ratio of amplitudes).*

*The amplitude of the sinusoidal alternating voltage can be converted into a time interval that is determined moments of transition harmonic signal at fixed levels. An improved method for measuring the phase-frequency amplitude sinusoidal alternating voltage. Shown using this method to implement multi-meters (using several reference voltages) and to measure the ratio of variable amplitude sinusoidal voltage. Accuracy meters designed mainly determined by the accuracy of measurement or conversion time intervals.*

*Thus, the article made autocompensation phase-frequency method for measuring amplitude sinusoidal alternating voltage, modifications which can be used in multi-channel devices and in measuring the ratio of amplitudes.*

*Keywords: amplitude sinusoidal alternating voltage, phase-frequency measurement method reference voltage, the ratio of amplitudes, measurement error.*

#### Вступ

Пристрій для вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми називається вольтметром змінного струму. Типова структурна схема вольтметра змінного струму складається з

перетворювача змінної напруги в постійну, підсилювача і вимірювального приладу (цифрового або магнітоелектричного вимірювального механізму). Можливі два варіанти побудови вольтметрів змінного струму, що відрізняються своїми характеристиками. За першим варіантом побудови вхідна вимірювана напруга спочатку перетворюється у постійну напругу, яка потім подається на підсилювач постійного струму (ППС) і вимірювальний механізм (ВМ), який фактично є вольтметром постійного струму. Перетворювачем є малоінерційне коло, тому вольтметри з такою структурою можуть працювати в широкому діапазоні частот (від одиниць Гц до одиниць ГГц в залежності від конструкції вимірювального перетворювача). Однак підвищення чутливості таких вольтметрів шляхом збільшення коефіцієнта підсилення ППС  $k_{ППС}$  призводить до технічних труднощів, що пов'язані з нестабільністю роботи ППС, яка характеризується дрейфом нуля підсилювача та зміною  $k_{ППС}$ . Тому у таких вольтметрах, як правило, приймають  $k_{ППС} \approx 1$ , а основне призначення ППС – забезпечити максимальний вхідний опір вольтметра. Тому верхня межа вимірювань при максимальній чутливості складає десятки – одиниці мілівольт.

У вольтметрах, побудованих за другим варіантом, завдяки попередньому підсиленню, яке реалізується підсилювачем змінного струму (ПЗС), можна збільшити чутливість. Однак реалізація ПЗС з великим коефіцієнтом підсилення, що працюють в широкому діапазоні частот, є доволі складним технічним рішенням. Тому такі вольтметри мають відносно вузький діапазон робочих частот з верхньою робочою частотою порядку (1...10) МГц, а верхня межа вимірювань при максимальній чутливості складає сотні – десятки мікрівольт [1].

Тому очевидно, що недоліком першого варіанту побудови вольтметра змінного струму є низька чутливість, а другого – вузький частотний діапазон. Тому для того, щоб підвищити точність вимірювань амплітуди змінної напруги на високих частотах (більше 10 МГц) необхідно вийти за межі обох цих варіантів побудови [1].

### Постановка задачі

Цікавий фазочастотний метод вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми запропоновано Гульчаком Ю.П. в роботі [2]. При реалізації даного методу часовий інтервал  $\tau$  (рис.1) визначається часовими моментами переходу гармонічного сигналу через рівні  $+U_0$  та  $-U_0$ . Також в роботі [2] одержано співвідношення для амплітуди напруги з перетворенням в часовий інтервал:

$$U_m = U_0 \operatorname{cosec} \left( \frac{2\pi\tau}{4T} \right) = \frac{U_0}{\sin \left( \frac{2\pi\tau}{4T} \right)}, \quad (1)$$

де  $T$  – період вимірюваної напруги;  
 $U_0$  – опорна напруга.

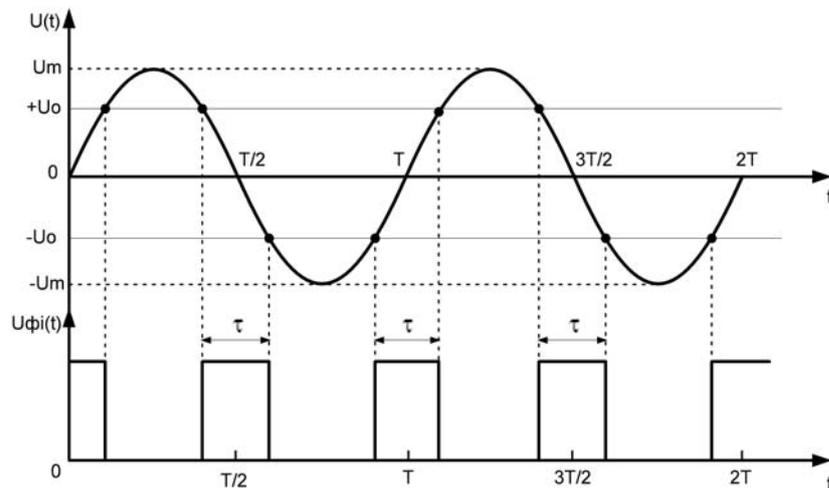


Рис. 1. Часові діаграми роботи пристрою для реалізації фазочастотного методу вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми

Однак співвідношення (1) є некоректним, тому що аргумент тригонометричних функцій вдвічі зменшений. Тому вірним співвідношенням для визначення амплітуди напруги при перетворенні в часовий інтервал є таке:

$$U_m = U_0 \operatorname{cosec} \left( \frac{\pi\tau}{T} \right) = \frac{U_0}{\sin \left( \frac{\pi\tau}{T} \right)}, \quad (2)$$

Похибка вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми  $U_m$  визначається похибкою задавання опорної напруги  $U_0$ , похибкою вимірювання часового інтервалу  $\tau$  та нелінійною

залежністю між  $U_m$  та  $U_0$ .

В роботі [3] авторами запропоновано автокомпенсаційний фазочастотний метод вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми, сутність якого зводиться до наступного. Часовий інтервал  $\tau$  визначається точками переходу випрямленого гармонічного сигналу через рівень  $U_0$ . При цьому шпаруватість отриманої імпульсної послідовності буде дорівнювати  $q = 2$  тільки у випадку, коли

$$U_0 = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

У такому разі постійна складова імпульсної послідовності буде визначатися як

$$U_{0,imn} = \frac{U_{m,imn}}{q} = \frac{U_{m,imn}}{2}$$

і не буде дорівнювати нулю, як вказано в роботі [3]. Тому і послідовність

наступних перетворень сигналів не призведе до отримання результату вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми.

Метою даної роботи є вдосконалення фазочастотного методу вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми (з можливістю використання його до вимірювання відношення амплітуд).

#### Розв'язання поставленої задачі

Для компенсації вказаних недоліків в даній роботі автором запропоновано вдосконалений автокомпенсаційний фазочастотний метод вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми. Згідно із запропонованим методом потрібно сформувати дві імпульсні послідовності (на рис. 2 їм відповідають напруги  $U_{\phi I,1}(t)$  та  $U_{\phi I,2}(t)$ ), тривалості імпульсів яких визначаються інтервалом часу між моментами збігу вимірюваної змінної напруги синусоїдальної форми  $U(t)$  з позитивною постійною опорною напругою  $+U_0$ . При формуванні напруг  $U_{\phi I,1}(t)$  та  $U_{\phi I,2}(t)$  потрібно врахувати, що напруга  $U_{\phi I,2}(t)$  є проінвертованою напругою  $U_{\phi I,1}(t)$ . Тому що метод вимірювання є автокомпенсаційним, то рівень опорної напруги  $+U_0$  в процесі вимірювання буде змінюватися доти, доки не буде дорівнювати

діючому значенню змінної напруги синусоїдальної форми  $+U_0 = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ . У цьому разі тривалості імпульсних

послідовностей  $\tau_1 = \frac{3T}{4}$  та  $\tau_2 = \frac{T}{4}$ , однак при будь-якому значенні  $+U_0$  виконується умова  $\tau_1 + \tau_2 = T$ .

Структурна схема пристрою, в якому реалізовано запропонований вдосконалений фазочастотний метод вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми, наведена на рис. 3. Запропонований пристрій складається з вхідного підсилювача, формувача імпульсів, в якості якого можна використовувати компаратор на операційному підсилювачі, керуваного джерела опорної напруги  $U_0$ , двох інтеграторів, інвертора, підсилювача з фіксованим коефіцієнтом підсилення  $K = 3$ , елементу порівняння та вимірювача постійної напруги.

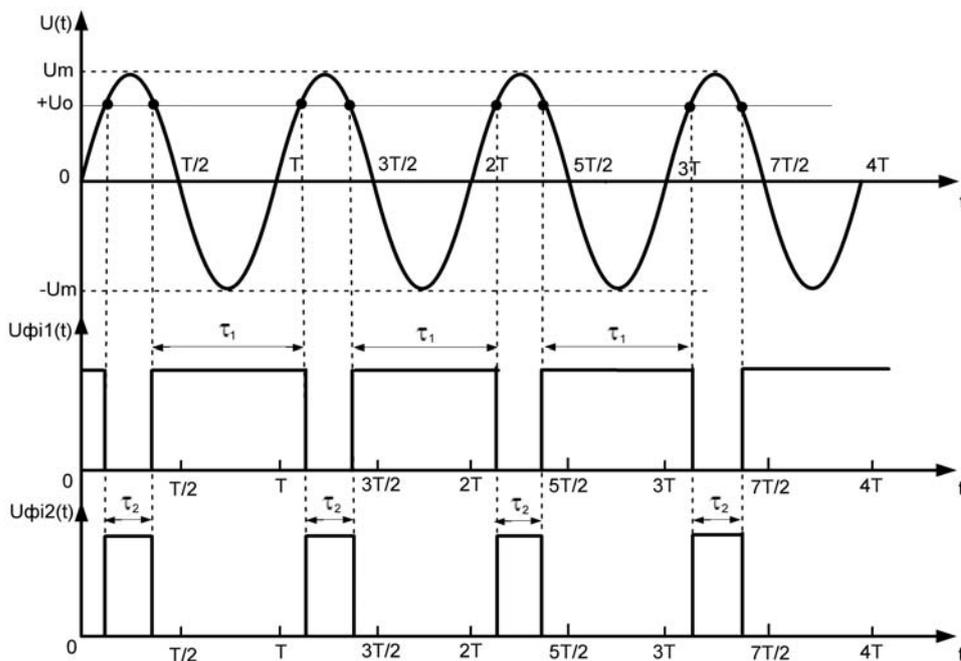


Рис. 2. Часові діаграми роботи пристрою для реалізації вдосконаленого фазочастотного методу вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми

Пристрій, в якому реалізовано запропонований вдосконалений фазочастотний метод вимірювання

амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми (рис. 3), працює таким чином. На вхід вхідного підсилювача, який призначений для узгодження джерела вхідного сигналу з вимірювачем за напругою, має високий вхідний опір та коефіцієнт передачі напруги  $U_{BП} = 10^n$ , де  $n = \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$ , подається змінна напруга синусоїдальної форми  $U_{BX}(t) = U_{m.BX} \sin(\omega t + \varphi)$ . Вихідний сигнал вхідного підсилювача має вигляд  $U(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ , при цьому враховується значення масштабного коефіцієнта

$$U_{BП} = \frac{U_m}{U_{m.BX}} = 10^n, \text{ яке є меншим одиниці для великих амплітуд вхідного сигналу і більшим одиниці для малих.}$$

Далі формувач імпульсів (компаратор) порівнює амплітуду вихідного сигналу вхідного підсилювача з деяким значенням опорної напруги  $U_0$  керованого джерела і за допомогою інвертора формує дві імпульсні послідовності  $U_{\Phi I.1}(t)$  та  $U_{\Phi I.2}(t)$ , зображені на рис. 2 (при цьому необхідно, щоб амплітуди цих імпульсних послідовностей були однаковими). Після цього вихідні імпульсні послідовності компаратора та інвертора за допомогою інтеграторів 1 та 2 перетворюються в рівні постійної напруги

$$U_{I.1} = \frac{U_{m.\Phi I}}{T} \cdot \tau_1 = \frac{U_{m.\Phi I}}{2\pi} \cdot \omega \tau_1 \text{ та } U_{I.2} = \frac{U_{m.\Phi I}}{T} \cdot \tau_2 = \frac{U_{m.\Phi I}}{2\pi} \cdot \omega \tau_2, \text{ де } U_{m.\Phi I} \text{ – амплітуда імпульсів вихідних сигналів компаратора та інвертора, } \omega \text{ – циклічна частота вхідної напруги.}$$

Вихідна напруга інтегратора 2 підсилюється з фіксованим коефіцієнтом підсилення 3, набуває значення  $U_{П} = \frac{3U_{m.\Phi I}}{2\pi} \cdot \omega \tau_2$  і разом з напругою  $U_{I.1}$  подається на елемент порівняння, вихідна напруга якого дорівнює

$$U_{EP} = U_{П} - U_{I.1} = \frac{U_{m.\Phi I}}{2\pi} \cdot \omega (3\tau_2 - \tau_1). \text{ Ця вихідна напруга елемента порівняння змінює опорну напругу } U_0 \text{ керованого джерела доти, доки не буде виконуватися умова } 3\tau_2 = \tau_1, \text{ що досягається тоді, коли опорна напруга буде дорівнювати діючому значенню змінної напруги синусоїдальної форми } U_0 = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Таким чином, отриманий результат вимірювання (постійна напруга, виміряна вимірювачем постійної напруги) буде мати вигляд:

$$U_0 = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_{m.BX} \cdot 10^n}{\sqrt{2}} \Rightarrow U_{m.BX} = \frac{\sqrt{2} U_0}{10^n}. \tag{3}$$



Рис. 3. Структурна схема пристрою для реалізації вдосконаленого фазочастотного методу вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми

Похибка вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми в даному пристрої буде визначатися переважно точністю вимірювання опорної напруги  $U_0$  (за умови закінчення процесів регулювання у вимірювальному пристрої).

Розглянуту методику вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми можна використовувати в пристрої без автоматичної компенсації, якщо застосувати два фіксованих рівня опорної напруги (рис. 4). В цьому випадку у вимірювальному пристрої (рис. 5) компаратори 1 та 2 формують імпульси тривалістю  $\frac{T}{2} + \tau_1$  та  $\frac{T}{2} + \tau_2$ , при цьому менша тривалість імпульсу відповідає меншому значенню

опорної напруги (на рис. 4  $\Delta t_1 = \frac{T}{2} + \tau_1$ ,  $\Delta t_2 = \frac{T}{2} + \tau_2$ ). Амплітуда змінної напруги синусоїдальної форми з співвідношення (2) пропорційна тривалості часових інтервалів  $\tau_1$  та  $\tau_2$ , тобто:

$$U_m = \frac{U_{01}}{\sin\left(\frac{\pi\tau_1}{T}\right)} = \frac{U_{01}}{\sin\left(\frac{\pi(\Delta t_1 - 0.5T)}{T}\right)} = \frac{U_{01}}{\sin\left(\frac{\pi\Delta t_1}{T} - \frac{\pi}{2}\right)} = -\frac{U_{01}}{\cos\left(\frac{\pi\Delta t_1}{T}\right)} = -\frac{U_{02}}{\cos\left(\frac{\pi\Delta t_2}{T}\right)}, \quad (4)$$

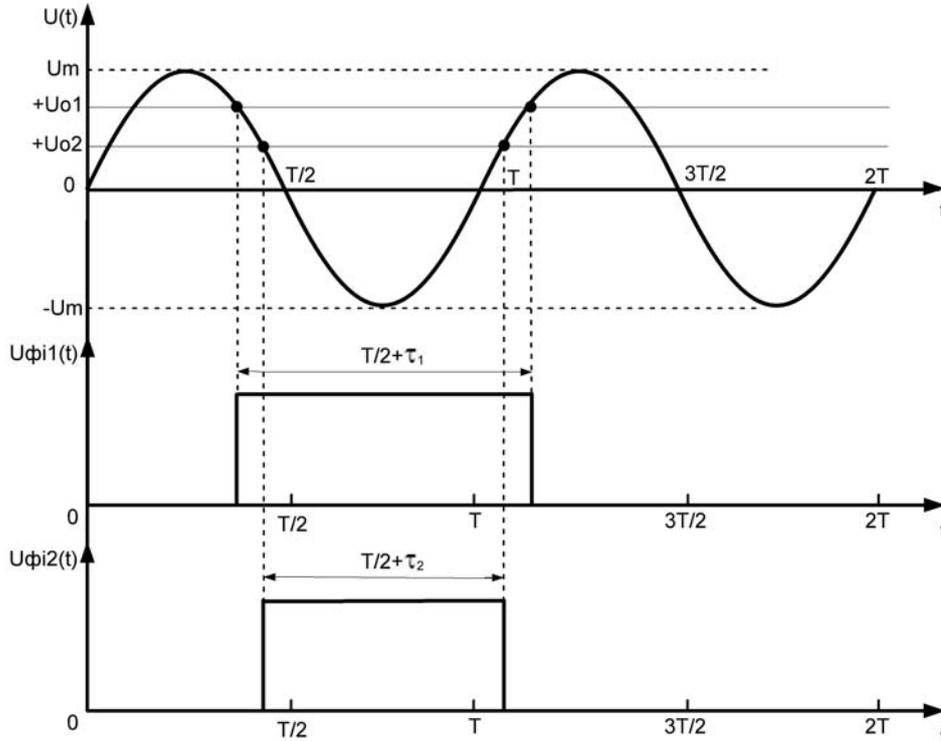


Рис. 4. Часові діаграми роботи пристрою для реалізації фазочастотного методу вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми з двома опорними напругами

З останнього співвідношення

$$\frac{U_{01}}{U_{02}} = \frac{\cos\left(\frac{\pi\Delta t_1}{T}\right)}{\cos\left(\frac{\pi\Delta t_2}{T}\right)}, \quad (5)$$

тобто рівень вихідної постійної напруги кожного інтегратора пропорційний часовому інтервалу  $\Delta t_i$ .

Таким чином, в схемі вимірювача (рис. 5) реалізований двоканальний пристрій, в якому амплітуду змінної напруги синусоїдальної форми можна визначати за даними кожного з каналів. Збільшивши кількість опорних напруг (та, відповідно, кількість каналів), можна реалізувати багатоканальний пристрій, в якому застосовано статистичні методи зменшення випадкової складової сумарної похибки вимірювання.

Також розглянуту методику вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми можна використовувати для вимірювання відношення амплітуд змінних напруг синусоїдальної форми (рис. 6). В цьому випадку у вимірювальному пристрої (рис. 7) компаратори 1 та 2 формують імпульси тривалістю  $\frac{T}{2} + \tau_1$  та  $\frac{T}{2} + \tau_2$ , при цьому менша тривалість імпульсу відповідає більшому значенню амплітуди змінної

напруги синусоїдальної форми (на рис. 6  $\Delta t_1 = \frac{T}{2} + \tau_1$ ,  $\Delta t_2 = \frac{T}{2} + \tau_2$ ).

Зв'язок між амплітудами змінних напруг синусоїдальної форми та значенням опорної напруги також буде пропорційним тривалості часових інтервалів  $\tau_1$  та  $\tau_2$ , тобто:

$$U_0 = -U_{m1} \cos\left(\frac{\pi\Delta t_1}{T}\right) = -U_{m2} \cos\left(\frac{\pi\Delta t_2}{T}\right). \quad (6)$$

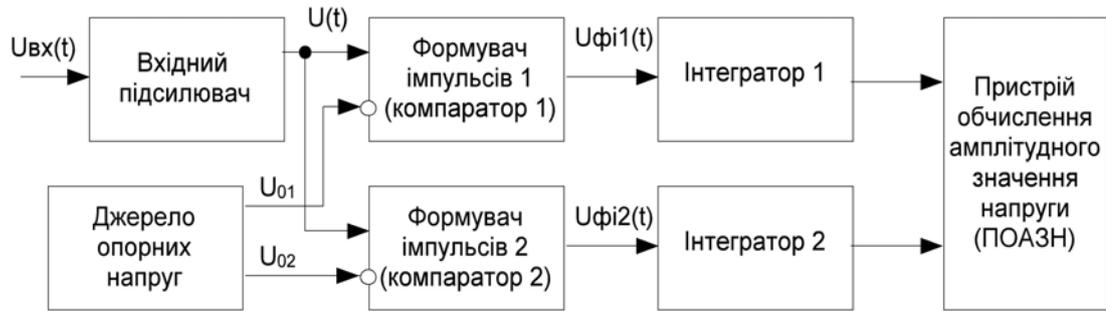


Рис. 5. Структурна схема пристрою для реалізації фазочастотного методу вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми з двома опорними напругами

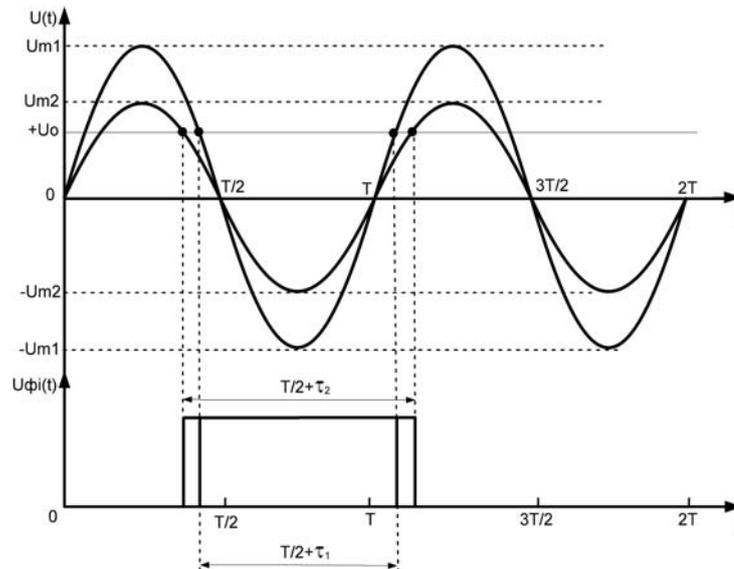


Рис. 6. Часові діаграми роботи пристрою для реалізації фазочастотного методу вимірювання відношення амплітуд змінних напруг синусоїдальної форми

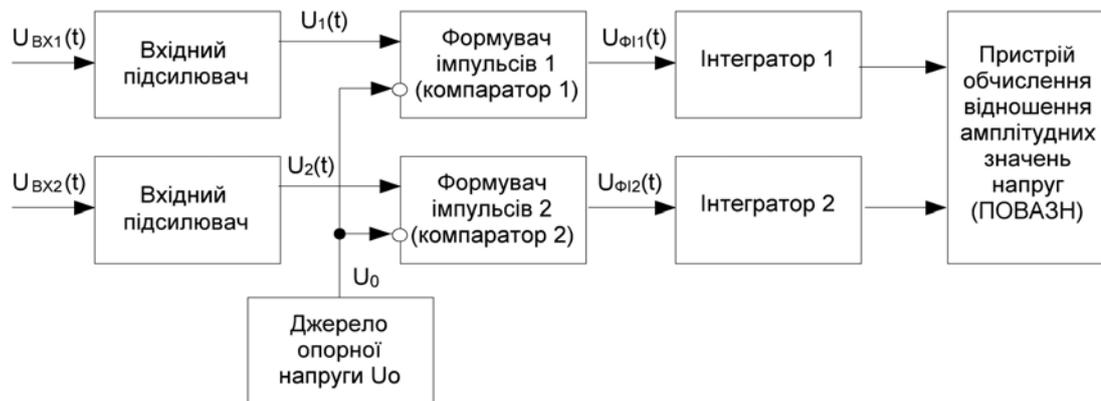


Рис. 7. Структурна схема пристрою для реалізації фазочастотного методу вимірювання відношення амплітуд змінних напруги синусоїдальної форми

З останнього співвідношення відношення амплітуд змінних напруг синусоїдальної форми

$$\frac{U_{m1}}{U_{m2}} = \frac{\cos\left(\frac{\pi\Delta t_2}{T}\right)}{\cos\left(\frac{\pi\Delta t_1}{T}\right)}. \quad (7)$$

Таким чином, відношення амплітуд змінних напруг синусоїдальної форми перетворюється у відношення постійних напруг (вихідних напруг інтеграторів), пропорційних тривалості часових інтервалів  $\Delta t_1$  та  $\Delta t_2$ .

Похибка вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми (або відношення амплітуд змінних напруги синусоїдальної форми) в пристроях рис. 5 та рис. 7 буде визначатися в основному точністю вимірювання (або перетворення) часових інтервалів  $\Delta t_1$  та  $\Delta t_2$ .

### Висновки

1. Амплітуда змінної напруги синусоїдальної форми може бути перетворена в часовий інтервал, що визначається моментами переходу гармонічного сигналу через фіксовані рівні.
2. Запропоновано вдосконалений фазочастотний метод вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми.
3. Показано, що дану методику можна використовувати як для реалізації багатоканальних вимірювачів (при використанні декількох опорних напруг), так і для вимірювання відношення амплітуд змінних напруг синусоїдальної форми.
4. Похибка розроблених вимірювачів буде визначатися в основному точністю вимірювання (або перетворення) часових інтервалів (імпульсних послідовностей).

### Література

1. Основы метрологии и электрические измерения / [Авдеев Б. Я., Антонюк Е. М., Душин Е. М. и др.]; под ред. Е. М. Душина. – [6-е изд., перераб. и доп.]. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1987. – 480 с.
2. Гульчак Ю. П. Розробка і дослідження програмно-апаратних методів вимірювання часових параметрів сигналів в пристроях фазометричних систем: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.08 “Радіовимірювальні прилади” / Ю. П. Гульчак. – Вінниця, 1996. – 17 с.
3. Троянов Г. Ю. Огляд методів вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми / Г. Ю. Троянов, І. В. Троцишин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: міжнар. наук. – техн. конф., 27-29 травня 1999 р.: тези доповіді. – Хмельницький, 1999. – С. 91-94.

### References

1. Osnovi metrologii i elektricheskie izmereniya / [Avdeev B. Ya., Antonyuk E. M., Dushin E. M. i drugiye]; Ed. by E. M. Dushin. – [6-e izd., pererab. i dop.]. – Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1987, 480 p. [in Russian].
2. Gulchak Yu. P. Rozrobka i doslidzennya programno-aparatnih metodiv vimiryuvannya chasovih parametriv signaliv v pristroyah fazometrichnih system: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tehn. nauk: spets. 05.11.08 “Radiovimiryvalni prilady” / Yu. P. Gulchak. – Vinnitsa, 1996, 17 p. [in Ukrainian].
3. Troyanov G. Yu. Oglyad metodiv vimiryuvannya amplitudy zminnoyi naprugi sinusoidalnoyi formi / G. Yu. Troyanov, I. V. Trotsishin // Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih protzesah: mizhnar. nauk. – tehn. konf., 27-29 travnya 1999 r.: tezi dopovidi. – Khmelnytskyi, 1999, pp. 91-94. [in Ukrainian].

Рецензія/Peer review : 20.10.2015 р.

Надрукована/Printed : 15.12.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Древецький В.В.

УДК 004.7

С.М. БАБЧУК

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ  
НАФТОГАЗОВИХ ПІДПРИЄМСТВ НА БАЗІ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ  
КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ, ЯКІ ПІДТРИМУЮТЬ РЕЖИМ  
ОБМІНУ ДАНИМИ "КЛІЄНТ-СЕРВЕР"**

*В результаті проведеної роботи створено класифікацію спеціалізованих комп'ютерних мереж які підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер". Також розроблено структуру системи управління технологічними процесами на базі спеціалізованих комп'ютерних мереж, які підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер", для підприємств нафтогазового комплексу.*

*Впровадження в системах управління технологічними процесами на базі спеціалізованих комп'ютерних мереж, які підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер", для підприємств нафтогазового комплексу за рахунок "спорідненості" з комп'ютерами верхнього рівня дозволить уникнути додаткових витрат на підготовку професіоналів, що забезпечують їх експлуатацію. Цю роботу зможуть виконувати фахівці, що забезпечують експлуатацію комп'ютерів верхнього рівня. Це дозволить скоротити терміни впровадження систем керування й спростить процедури їх експлуатації, що в остаточному підсумку сприятиме загальному зниженню витрат на створення або модернізацію АСУ ТП.*

*Ключові слова: спеціалізовані комп'ютерні мережі, промислові мережі, Foundation Fieldbus, HART, Interbus, WorldFIP, EtherNet/IP, автоматизовані системи управління технологічними процесами.*

**S. BABCHUK**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

**DECISION SUPPORT SYSTEM ALGORITHMIC SOFTWARE ON SPECIALIZED  
COMPUTER NETWORK (FIELD BUS) SELECTION FOR TECHNOLOGICAL PROCESSES  
AUTOMATION SYSTEMS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES**

*The work resulted in the classification established specialized networks that support data exchange mode "client-server". Also developed structure of process control systems based on specialized networks that support data exchange mode "client-server" for oil and gas companies.*

*The introduction of the process control system based on specialized networks that support data exchange mode "client-server" for oil and gas companies through "affinity" with computers upper level will avoid the additional cost of training professionals, providing their operation. This work will carry out specialists to ensure top-level operation of computers. This will reduce the time of implementation of control systems and simplify procedures for their operation, which ultimately contribute to reducing the overall costs of the creation or modernization of automated process control systems.*

*Keywords: fieldbus, specialized computer networks, industrial networks, Foundation Fieldbus, HART, Interbus, WorldFIP, EtherNet/IP, automated process control systems.*

**Постановка проблеми**

В даний час в світі використовується близько ста спеціалізованих комп'ютерних мереж. Велика кількість спеціалізованих комп'ютерних мереж пов'язана з наявністю великої кількості вимог до технологічних процесів, які автоматизуються. Ці вимоги не можуть бути задоволені універсальним і економічно оптимальним рішенням.

Коли обговорюється питання про вибір типу спеціалізованих комп'ютерних мереж, необхідно враховувати для якого саме рівня автоматизації цей вибір здійснюється. Залежно від місця мережі в ієрархії промислового підприємства вимоги до її функціональних характеристик будуть різні.

Ієрархія АСУ промисловим підприємством звичайно представляється у вигляді триповерхової піраміди:

- рівень керування підприємством (верхній рівень);
- рівень керування технологічним процесом;
- рівень керування пристроями.

На рівні керування підприємством розташовуються звичайні IBM-PC-сумісні комп'ютери й файлові сервери, об'єднані локальною мережею. Завдання обчислювальних систем на цьому рівні - забезпечення візуального контролю основних параметрів виробництва, побудова звітів, архівування даних. Обсяги переданих між вузлами даних вимірюються мегабайтами, а часові показники обміну інформацією не є критичними.

На рівні керування технологічним процесом здійснюється поточний контроль і керування або в ручному режимі з операторських пультів, або в автоматичному режимі по закладеному алгоритму. На цьому рівні виконуються узгодження параметрів окремих ділянок виробництва, відпрацювання аварійних і передаварійних ситуацій, параметризація контролерів нижнього рівня, завантаження технологічних

програм, дистанційне керування виконавчими механізмами. Інформаційний кадр на цьому рівні містить, як правило, кілька десятків байтів, а припустимі тимчасові затримки можуть становити від 100 до 1000 мілісекунд залежно від режиму роботи.

На рівні керування пристроями розташовуються контролери, що здійснюють безпосередній збір даних від датчиків і керування виконавчими пристроями. Розмір даних, якими контролер обмінюється з кінцевими пристроями, звичайно становить кілька байтів при швидкості опитування пристроїв не більше 10 мс.

Наявність на ринку різноманітних наборів програмно-апаратних рішень дозволяє вирішити технологічні проблеми практично будь-якого виробництва. Для підприємств практично повністю втратили зміст власні розробки в цій області. Спроба заощадити засоби за рахунок внутрішніх ресурсів у більшості випадків обертається створенням громіздких, ненадійних, несумісних і дорогих в обслуговуванні систем;

Різнманітність вимог автоматизуючих технологічних процесів не може бути вирішена одним універсальним і економічно оптимальним рішенням. Тільки належне структурування комплексу АСУ ТП і вибір оптимальних рішень для конкретних технологічних ділянок може забезпечити прорив підприємства на новий рівень якості й ефективності виробництва.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

В даний час підприємствами світу використовується близько сотні різних спеціалізованих комп'ютерних мереж, протоколів і інтерфейсів, застосовуваних у системах автоматизації [1-14]. Проте, інформація про них в українських засобах інформації майже відсутня. Тому, керівництво підприємств та служб КВП і А обмежені в інформації, яка необхідна для прийняття зважених і обґрунтованих рішень. Сьогодні рішення щодо вибору тієї чи іншої спеціалізованої комп'ютерної мережі приймаються керівництвом підприємства-споживача на обмеженій інформаційній базі або на основі інформації, отриманої від одного зацікавленого джерела (продавця обладнання одного виробника), що не дозволяє зробити оптимальний вибір.

Більшість спеціалізованих комп'ютерних мереж відрізняються від традиційних мереж верхнього рівня управління підприємством. Впровадження в системах управління технологічними процесами на базі спеціалізованих комп'ютерних мереж, які підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер", для підприємств нафтогазового комплексу за рахунок "спорідненості" з комп'ютерами верхнього рівня дозволить уникнути додаткових витрат на підготовку професіоналів, що забезпечують їх експлуатацію. Цю роботу зможуть виконувати фахівці, що забезпечують експлуатацію комп'ютерів верхнього рівня. Це дозволить скоротити терміни впровадження систем керування і спростити процедури їх експлуатації, що в остаточному підсумку сприятиме загальному зниженню витрат на створення або модернізацію АСУ ТП.

### **Формулювання завдання дослідження**

В зв'язку з вищевказаним, метою досліджень було створити класифікацію спеціалізованих комп'ютерних мереж, які підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер" та розробити структуру системи управління технологічними процесами на базі спеціалізованих комп'ютерних мереж, які підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер", для підприємств нафтогазового комплексу.

### **Класифікація спеціалізованих комп'ютерних мереж які підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер"**

Важливою класифікаційною ознакою для спеціалізованих комп'ютерних мереж є їх відповідність міжнародному стандарту ІЕС 61158-2, що регламентує вимоги до мереж, які можуть працювати у вибухонебезпечних зонах.

Необхідно відмітити, що в залежності від того на базі якої технології (унікальної чи поширеної) побудована спеціалізована комп'ютерна мережа, в подальшому це буде впливати на зручність об'єднання з іншими комп'ютерними мережами (в тому числі і "офісними"). Наприклад, якщо спеціалізована комп'ютерна мережа створена на базі технології Ethernet, то в подальшому можна її без особливих проблем об'єднати з так званими "офісними мережами".

Також при класифікації спеціалізованих комп'ютерних мереж важливе значення має швидкість передавання даних, адже даний показник впливає на можливість застосування мережі на одному з рівнів ієрархії АСУ промисловим підприємством, яка висуває певні вимоги до забезпечення мережами визначених швидкостей передавання даних на кожному рівні.

В результаті проведеного аналізу існуючих спеціалізованих комп'ютерних мереж визначено ті, що підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер". З метою створення методичної бази для вибору необхідних спеціалізованих комп'ютерних мереж, які підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер", створено класифікацію таких мереж (рис.1).

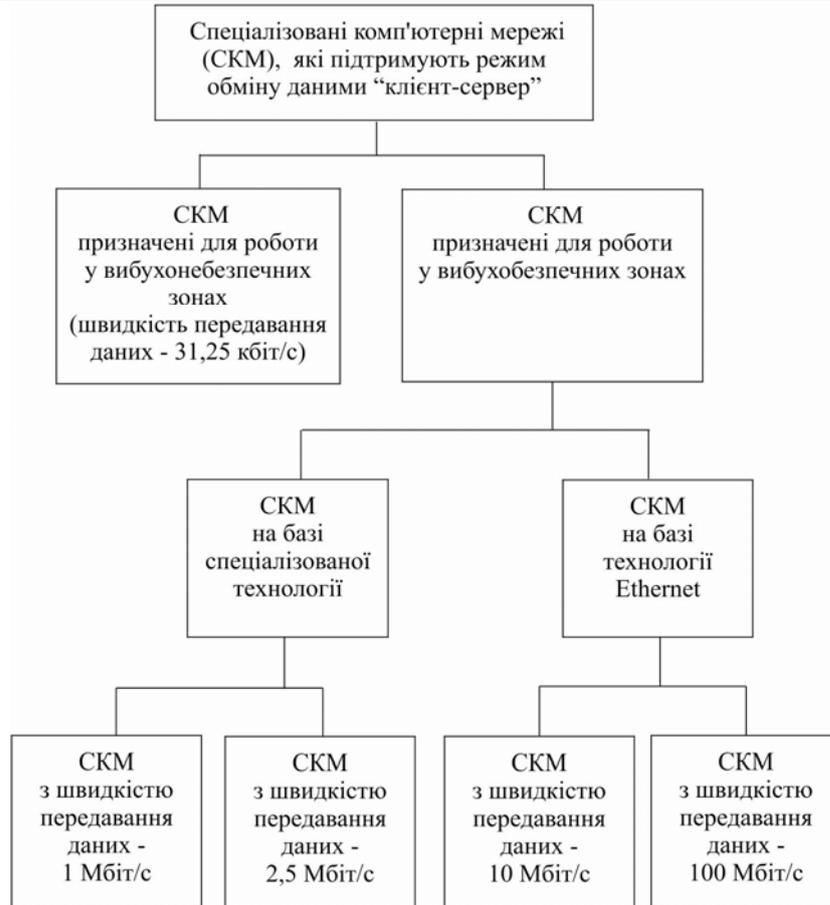


Рис. 1. Класифікація спеціалізованих комп'ютерних мереж які підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер"

### Розробка структури системи управління технологічними процесами нафтогазових підприємств на базі спеціалізованих комп'ютерних мереж, які підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер"

В цілому підприємства нафтогазового комплексу є великими, складними та в певному сенсі "унікальними" підприємствами, які мають ряд своїх індивідуальних особливостей та характеристик відмінних від інших підприємств даної галузі. Проте, виробничі потужності даних підприємств мають наступні спільні характеристики:

- розподілені на значних територіях;
- технологічні лінії різного типу і призначення;
- необхідно забезпечити керування в режимі "реального часу";
- наявністю вибухонебезпечних ділянок виробництва;
- на різних рівнях та / або ділянках автоматизації підприємств необхідно передавати різні об'єми даних.

Враховуючи вищевказане було створено структуру системи управління технологічними процесами нафтогазових підприємств на базі спеціалізованих комп'ютерних мереж, які підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер" (рис.2).

У вибухонебезпечних зонах доцільно застосувати спеціалізовану комп'ютерну мережу Foundation Fieldbus H1. Дана мережа є сертифікована для роботи у вибухонебезпечних зонах у відповідності до міжнародного стандарту IEC 61158-2. У відповідності до вказаного міжнародного стандарту мережа забезпечує передавання даних з швидкістю 31,25 Кбіт/с.

У вибухобезпечних виробничих зонах слід використати спеціалізовану комп'ютерну мережу Foundation Fieldbus H2. Є дві модифікації даної мережі: одна забезпечує швидкість передавання даних в 1 Мбіт/с, а друга – в 2,5 Мбіт/с.

На рівні керування технологічними процесами необхідно впровадити спеціалізовану комп'ютерну мережу Foundation Fieldbus HSE. Є дві модифікації даної мережі: одна забезпечує швидкість передавання даних в 10 Мбіт/с, а друга – в 100 Мбіт/с. Крім високої швидкості передавання даних дана спеціалізована комп'ютерна мережа має ще одну позитивну рису: вона побудована на базі технології Ethernet, як і мережі рівня керування підприємством, а це дозволяє без значних затрат та досить легко об'єднати в єдиний інформаційний простір промислові та офісні комп'ютерні системи.

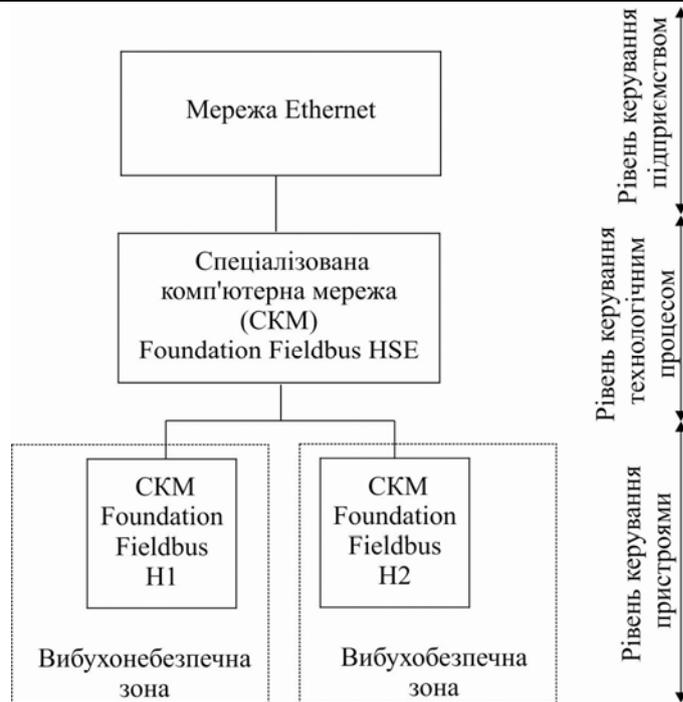


Рис. 2. Структура системи управління технологічними процесами нафтогазових підприємств на базі спеціалізованих комп'ютерних мереж, які підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер"

### Висновки

В результаті проведеного аналізу існуючих спеціалізованих комп'ютерних мереж визначено такі, що підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер".

В результаті проведеної роботи створено класифікацію спеціалізованих комп'ютерних мереж які підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер". Також розроблено структуру системи управління технологічними процесами на базі спеціалізованих комп'ютерних мереж, які підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер", для підприємств нафтогазового комплексу.

Впровадження в системах управління технологічними процесами на базі спеціалізованих комп'ютерних мереж, які підтримують режим обміну даними "клієнт-сервер", для підприємств нафтогазового комплексу за рахунок "спорідненості" з комп'ютерами верхнього рівня дозволить уникнути додаткових витрат на підготовку професіоналів, що забезпечують їх експлуатацію. Цю роботу зможуть виконувати фахівці, що забезпечують експлуатацію комп'ютерів верхнього рівня. Це дозволить скоротити терміни впровадження систем керування й спростить процедури їх експлуатації, що в остаточному підсумку сприятиме загальному зниженню витрат на створення або модернізацію АСУ ТП.

### Література

1. Бабчук, С. М. Визначення напрямків модернізації існуючих автоматизованих систем управління технологічними процесами, які розміщені у вибухонебезпечних зонах / С.М. Бабчук // Міжнародний науково-технічний журнал "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах". – 2014. – №2. – С. 103-107.
2. Бабчук, С. М. Вибір спеціалізованої комп'ютерної мережі для систем автоматизації у вибухонебезпечних зонах промислових підприємств. // Міжнародний науково-технічний журнал "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах". – 2015. – №1. – С. 127-132.
3. Guochen, A. Design of Intelligent Transmitter Based on HART Protocol [Text] / A. Guochen, M. Zhiyong, M. Hongtao, S. Bingdong // Intelligent Computation Technology and Automation. – 2010. – Vol. 2. – P. 40-43.
4. Бабчук, С. М. Мікропроцесорна система управління процесом буріння на базі промислової комп'ютерної мережі / С. М. Бабчук, О. І. Іванкевич // Восточно-європейський журнал передових технологій. – 2008. – №4/3 (34). – С. 15-17.
5. Cavalieri, S. Definition of a fault recovery protocol compliant with Interbus-S standard [Text] / S. Cavalieri // Industrial Electronics. – 2003. – P. 821-823.
6. Бабчук, С. М. Класифікація промислових комп'ютерних мереж / С. М. Бабчук // Восточно-європейський журнал передових технологій. – 2009. – №4/2(40). – С. 49-51.
7. Бабчук С.М. Модель контролю енергетичних параметрів дизельного приводу ротора бурових установок // Науковий вісник Івано-Франківського технічного університету нафти і газу. – 2002. - №1. С.60-63.
8. Zhang, L. Research of EtherNet/IP and development of its network node [Text] / L. Zhang, N. Xie // Consumer Electronics, Communications and Networks. – 2012. – P. 486-489.
9. Бабчук, С. М. Контроль вмісту кадмію в посуді комп'ютерною системою [Текст] / С. М. Бабчук,

- Л. Р. Бабчук // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 6/2(60). – С. 14-17.  
 10. Бабчук, С. М. Спеціалізована експертна комп'ютерна система ідентифікації кадмію / С. М. Бабчук, Л. Р. Бабчук // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №2/10(62). – С. 18-20.  
 11. Бабчук, С. М. Синтез бази знань “спеціалізовані комп'ютерні мережі” для об'єктів нафтогазового комплексу / С. М. Бабчук // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – №3/2(69). – С. 14-18.  
 12. Ping, L. Ethernet/IP Analysis [Text] / Journal of Yangtze University. – 2010. – Vol. 7, № 1. – P. 254-255.  
 13. Технический обзор “FOUNDATION fieldbus”. Fieldbus Foundation, Остин (Техас, США). – 1998. – 31 с.  
 14. Гупта А., Каро Р. FOUNDATION FIELDBUS или PROFIBUS PA: выбор промышленной сети для автоматизации технологических процессов. / СТА. , № 3. – 1999. – с. 16-20.

#### References

1. Babchuk, S. M. Vyznachennya napryamkiv modernizaciji isnuyuchyx avtomatyzovanyx system upravlinnya tehnologichnymy procesamy, yaki rozmishheni u vybuxonebezpechnyx zonax / S.M. Babchuk // Mizhnarodnyj nauково-техничnyj zhurnal “Vymiryuvalna ta obchyslyuvalna texnika v tehnologichnyx procesax”. – 2014. – #2. – S. 103-107.
2. Babchuk, S. M. Vybir specializovanoi kompyuternoi merezhi dlya system avtomatyzaciji u vybuxobezpechnyx zonax promyslovyx pidpryyemstv. // Mizhnarodnyj nauково-техничnyj zhurnal “Vymiryuvalna ta obchyslyuvalna texnika v tehnologichnyx procesax”. – 2015. – #1. – S. 127-132.
3. Guochen, A. Design of Intelligent Transmitter Based on HART Protocol [Text] / A. Guochen, M. Zhiyong, M. Hongtao, S. Bingdong // Intelligent Computation Technology and Automation. – 2010. – Vol. 2. – P. 40–43.
4. Babchuk, S. M. Mikroprocesorna sistema upravlinnya procesom burinnya na bazi promyslovoi kompyuternoi merezhi / S. M. Babchuk, O. I. Ivankevych // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovix tehnologyj. – 2008. – #4/3 (34). – S. 15-17.
5. Cavalieri, S. Definition of a fault recovery protocol compliant with Interbus-S standard [Text] / S. Cavalieri // Industrial Electronics. – 2003. – P. 821–823.
6. Babchuk, S. M. Klasifikacija promyslovyx kompyuternyx merezh / S. M. Babchuk // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovix tehnologyj. – 2009. – #4/2(40). – S. 49-51.
7. Babchuk S.M. Model kontrolyu energetychnyx parametriv dyzelnogo pryvodu rotora burovyx ustanovok // Naukovyj visnyk Ivano-Frankivskogo texnichnogo universytetu nafty i gazu. – 2002. - #1. S.60-63.
8. Zhang, L. Research of EtherNet/IP and development of its network node [Text] / L. Zhang, N. Xie // Consumer Electronics, Communications and Networks. – 2012. – P. 486–489.
9. Babchuk, S. M. Kontrol vmistu kadmiyu v posudi kompyuternoyi systemoyi [Tekst] / S. M. Babchuk, L. R. Babchuk // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovix tehnologyj. – 2012. – # 6/2(60). – S. 14-17.
10. Babchuk, S. M. Specializovana ekspertna kompyuterna sistema identyfikaciji kadmiyu / S. M. Babchuk, L. R. Babchuk // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovix tehnologyj. – 2013. – #2/10(62). – S. 18-20.
11. Babchuk, S. M. Syntez bazy znan “specializovani kompyuterni merezhi” dlya obyektiv naftogazovogo kompleksu / S. M. Babchuk // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovix tehnologyj. – 2014. – #3/2(69). – S. 14-18.
12. Ping, L. Ethernet/IP Analysis [Text] / Journal of Yangtze University. – 2010. – Vol. 7, № 1. – P. 254-255.
13. Texnycheskij obzor “FOUNDATION fieldbus”. Fieldbus Foundation, Ostyn (Texas, SShA). – 1998. – 31 с.
14. Gupta A., Karo R. FOUNDATION FIELDBUS yly PROFIBUS PA: viber promishlennoj sety dlya avtomatyzacyyi tehnologicheskyyx processov. / СТА. , # 3. – 1999. – с. 16-20.

Рецензія/Peer review : 5.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 15.12.2015 р.

Рецензент:

УДК 621.7

С.В. БАБАК

ДП «Науково-технічний центр новітніх технологій НАН України», м. Київ

## ДИСТАНЦІЙНИЙ КОНТРОЛЬ ДОВКІЛЛЯ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ

*Розглянуто методи та засоби дистанційних досліджень навколишнього середовища об'єктів енергетики на базі безпілотних авіаційних комплексів і їх основні завдання. Пропонується використання мобільних комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем для вирішення задач автоматичного дистанційного контролю довкілля АЕС та ТЕС.*

*Ключові слова: дистанційний контроль довкілля, безпілотний авіаційний комплекс, моніторинг, інформаційно-вимірювальна система.*

S. BABAK

SE “Scientific and technical center of emerging technologies of the NAS of Ukraine”, Kyiv

### ENERGY OBJECTS ENVIRONMENT REMOTE CONTROL

*Abstract. Article looks at methods and techniques of energy objects environment remote researches and their main objectives. It is proposed to use computerized information-measurement systems on a basis of unmanned aerial complexes for solution of nuclear power plants and thermal power plants environment automatic remote control objective.*

*Key words: environment remote control, unmanned aerial complex, monitoring, information-measurement system.*

#### Постановка проблеми

АЕС, ТЕС та ряд інших підприємств енергетики відносяться до кола критично важливих та потенційно небезпечних об'єктів. Виконання міжнародних і державних програм по захисту навколишнього

середовища в районах розташування потенційно екологічно небезпечних виробництв, в тому числі і об'єктів енергетики, вимагає ведення постійного моніторингу довкілля [1-3]. Сучасний стан вирішення проблем контролю довкілля в Україні з різних причин не можна вважати задовільним. Проблематика досліджень навколишнього середовища має значне коло напрямів, кожен з яких характеризується відповідними особливостями та специфікою [2]. Найбільшого розвитку набув науково-технічний напрям досліджень довкілля об'єктів енергетики, в першу чергу АЕС та ТЕС. Цей напрям є пріоритетним в Україні: в його рамках сформовані державні програми, виконуються актуальні і важливі дослідження [1,2,6]. Реальний стан технічного обладнання об'єктів енергетики, які в основному відпрацювали свій технічний ресурс, вимагає створення нових систем моніторингу для дистанційного контролю довкілля. Вирішення пов'язаних з цим напрямів досліджень потребує використання сучасних досягнень науки і техніки, новітніх інформаційно-вимірювальних технологій, а їх ефективність залежить від розробки і практичного використання апаратно-програмних вимірювальних комплексів та систем.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз методів та засобів моніторингу навколишнього середовища об'єктів енергетики [1-4,6] свідчить про необхідність пошуку нових ефективних технологій дистанційного вимірювання характеристик довкілля з використанням сучасних інформаційних технологій, що дають можливість вирішувати задачі контролю, діагностики та прогнозу. В сучасних умовах експлуатації об'єктів енергетики України актуальним є забезпечення постійного контролю характеристик довкілля АЕС і ТЕС, особливо в важкодоступних місцях та за умов техногенної небезпеки. Актуальним залишається контроль радіаційної обстановки в Чорнобильській зоні та навколо інших АЕС [1,2].

**Метою статті** є аналіз перспективних напрямів створення комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем на базі безпілотних авіаційних комплексів.

### Результати досліджень

В зоні розташування АЕС або ТЕС (рис.1) за допомогою стаціонарних та пересувних екологічних лабораторій здійснюється періодичний забір проб повітря, води та ґрунту з метою контролю їх забруднення, забруднення поверхневих і підземних вод, дощових стоків, снігового покриву, донних відкладень водоєм, радіаційної обстановки, метеопараметрів, газопо-димових викидів, промислових стоків і скидів, радіаційного фону, стану пожежної безпеки тощо.

Вся інформація збирається з розгалуженої мережі екологічних постів, лабораторій та різних технологічних сегментів АЕС або ТЕС, передається за допомогою провідної чи безпроводної системи передачі даних і обробляється в інформаційно-аналітичному центрі, який забезпечує інформаційну підтримку управлінських рішень, енергозберігаючих режимів експлуатації об'єктів енергетики, прогнозування та аварійне реагування на нештатні ситуації.

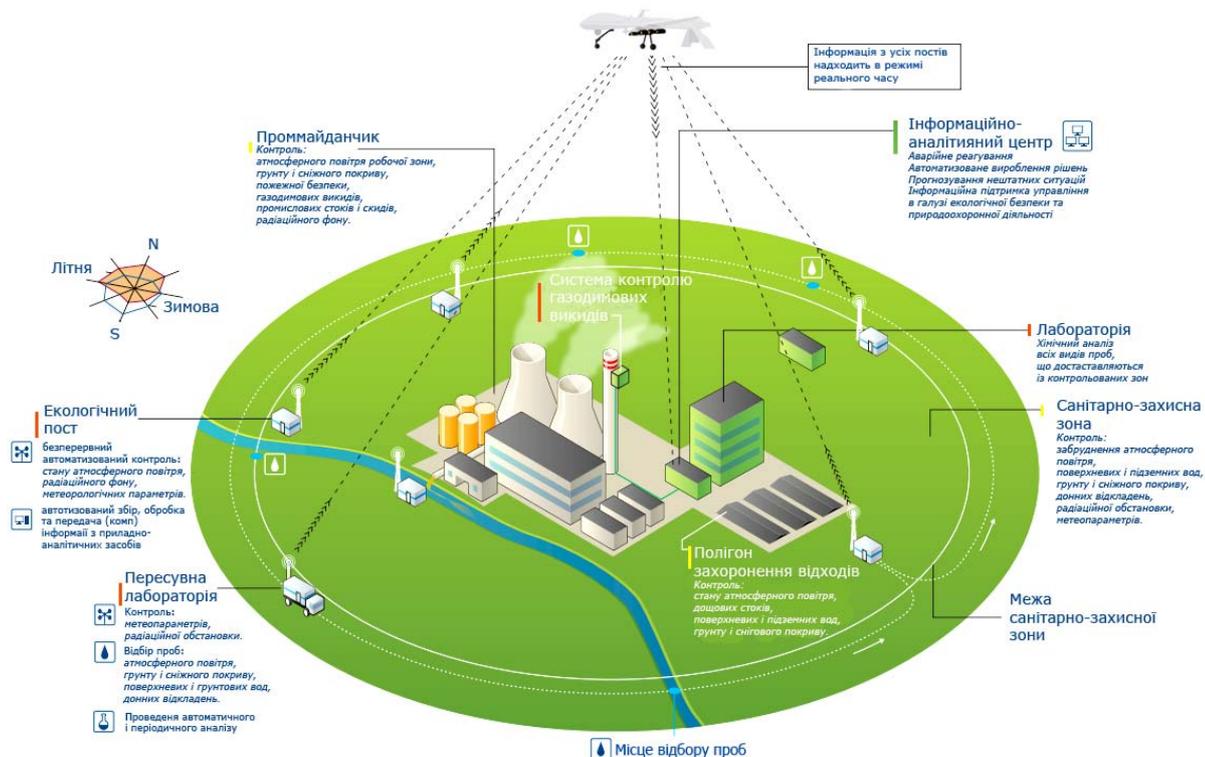


Рис. 1. Узагальнена схема функціонування інформаційно-аналітичної системи екологічного моніторингу на АЕС або ТЕС

В [3,4,6] розглянуто системи, побудовані на базі стаціонарних наземних пунктів контролю. Розташування останніх здійснюється з врахуванням екологічних особливостей місцевості, типу ландшафту,

метеорологічних умов, характеристики джерел потенційних загроз у сукупності з економічними та фізико-технічними чинниками. Розробка та експлуатація таких систем не завжди виправдані з різних причин. В першу чергу – це обмежені можливості доступу до певних пунктів спостереження (наприклад, в умовах заболоченої місцевості, розливу річок, наявності скальних масивів тощо), необхідність швидкого переналагоджування на той чи інший вид викидів чи випромінювань, необхідність забезпечити персонал від шкідливого впливу контрольованих об'єктів. Адже завжди існує кінцева ймовірність переходу об'єктів контролю у нештатні режими роботи з важкопрогнозованими наслідками аварій та інцидентів.

Процедури моніторингу реалізуються за допомогою різних технічних засобів. В автоматичному режимі такий моніторинг доцільно виконувати в атмосфері, адже середовищем існування і поширення різних фізичних полів, які характеризують поточний стан об'єктів атомної енергетики є атмосфера. Крім того збір виміральної інформації у повітряному середовищі в околі цих об'єктів можна здійснювати на значних ділянках (від одиниць до сотень кілометрів), дистанційно (тобто без фізичного контакту з об'єктом спостереження), в автоматичному режимі і практично безперервно в часі. Такий контроль може здійснюватись не тільки в штатних режимах, але й на початкових етапах розвитку загроз різного характеру та під час ліквідації аварій на АЕС, що становлять потенційну загрозу здоров'ю та життю людини.

Один з перспективних напрямів розвитку систем дистанційного моніторингу пов'язаний з використанням систем авіаційного базування на основі безпілотних авіаційних комплексів (БАК) [1,2]. За просторовим масштабом задач діагностики навколишнього середовища комп'ютеризовані інформаційно-вимірвальні системи (КІВС) на основі БАК можуть використовуватись у разі техногенних аварій локального та мезомасштабу. В таких системах БАК виконують роль транспортування засобів вимірювання у повітряному середовищі, так і для здійснення відеонагляду за різними об'єктами природного та штучного походження. Такі системи вперше були застосовані для контролю радіаційного фону та відеонагляду в районі Чорнобильської АЕС та АЕС Фукусіма [1,2].

Оскільки аварійні ситуації виникають несподівано, то доцільно в складі таких систем використовувати безпілотні літальні апарати (БПЛА), що не вимагають для старту і посадки підготовленої площадки, мають мінімальний час розгортання та помірні техніко-економічні показники. БПЛА повинен мати можливість дистанційного керування, а також виконувати політ в автоматичному режимі (наприклад, під управлінням автопілоту). З урахуванням корисного навантаження (відеоканал фронтального огляду, автопілот, пристрій відбору проб, вимірювач радіаційного фону тощо) злітна вага повинна становити 2-4 кг. Прийнятним для задоволення таких вимог є БПЛА літакового типу зі штовхаючим гвинтом на електричній тязі. Не зупиняючись на широкому спектрі подібних БПЛА, що випускаються в багатьох країнах, відзначимо, що науково-технічна складність їх створення відсутня. Однак компоновка під різні корисні навантаження приводить до відсутності універсального БПЛА і необхідності в кожному окремому випадку адаптувати їх конструкцію до конкретної задачі.

Зупинимось ще на одній характерній особливості таких систем. Побудова КІВС на основі БАК дозволяє здійснити через використання GPS прив'язку результатів вимірювань у будь-якій точці підконтрольного інформаційного простору до їх географічних координат, тобто узгодити дані вимірювань з геопросторовими даними – інформацією, яка ідентифікує географічне місце розташування і властивості природних або штучно створених об'єктів та їх межі на Землі [5]. Така прив'язка дозволяє використовувати дані, які отримуються в геоінформаційних системах (ГІС), тобто в системах з просторовою прив'язкою, в яких географічна інформація розглядається як функція, в числі аргументів якої є прив'язані до Землі просторові координати та висота.

Комплекс або КІВС контролю довікля розроблений як цілісна система, що складається з низки підсистем (рис. 2): наземного пункту управління, де розташоване робоче місце оператора і програмні додатки, що забезпечують контроль оператором роботи комплексу; БПЛА, який несе апаратуру корисного навантаження різного типу; системи зв'язку, яка забезпечує передачу команд управління зі станції управління на борт БПЛА, а також передачу корисної інформації з борту БПЛА на наземну станцію управління в режимі реального часу; обладнання у вигляді сенсорів та додаткових пристроїв, що забезпечують програмно-апаратну реалізацію мобільних КІВС. БПЛА мають велику ступінь автоматизації штучного інтелекту.

Забезпечується інтерактивний режим управління параметрами польоту та збору виміральної інформації, накопичення і передачу даних різноманітних сенсорів КІВС для отримання оптичних або тепловізійних зображень місцевості, разом з первинною інформацією про стан БПЛА – висоту, курс, швидкість, крен і т. д. Функціональна орієнтованість БПЛА обумовила необхідність удосконалень побудови авіоніки для з використанням мікромеханічних елементів і систем. Бортові контролери (процесори) і лінії зв'язку скомплексовані як ядро системи, що забезпечує основні (критичні) лінії зв'язку між бортовими сенсорами і наземною апаратурою, а також системами управління двигуном. Багатофункціональні можливості, потреба в яких визначається обмеженнями ваги і потужності, досягнуті високоінтегрованою конструкцією з фізичними багатофункціональними компонентами. Наприклад, крило також служить як антена або апертура сенсора і т. д. Для підвищення точності визначення вектора стану, разом з фільтрацією Калмана розроблено алгоритм нейромережевої апроксимації довільної щільності розподілу ймовірності. Нейромережі можуть навчатися на реальних вимірюваннях, а не на моделі похибок, що дозволило обійти невизначеності моделі. Виконання вищезазначених функцій забезпечено використанням змінного корисного

навантаження модульної побудови, яке встановлюється на внутрішній та/або на зовнішній підвісках БПЛА. По суті БПЛА – це авіаційна платформа для транспортування корисного навантаження, яке може включати: сенсори збору інформації, у т.ч.: фото-, теле-, тепловізійні та мультиспектральні камери (ЕО/ІR); лазерні сканери та далекоміри (LRF/LD); РЛС із синтезованою апертурою (SAR); обладнання для ретрансляції зв'язку; багатофункціональну комп'ютеризовану інформаційно-вимірювальну систему тощо. При визначенні (виборі) варіантів компоновки модулів корисного навантаження враховуються завдання контролю, технічні характеристики сенсорів, їх переваги і недоліки, а також умови виконання польотних, контрольно-вимірювальних або інших завдань за призначенням (погода, місцевість, час доби і пора року та інші фактори).

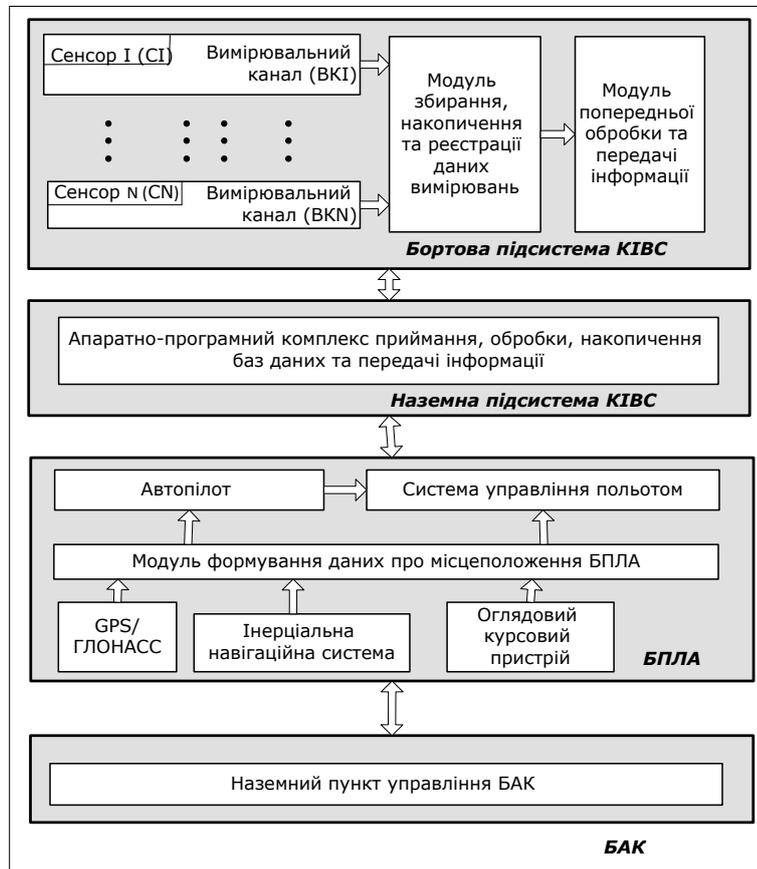


Рис. 2. Узагальнена структура КІВС на базі БАК

Експериментальні дослідження були проведені з використанням БПЛА, фото та характеристики якого наведено на рис. 3.



а)

Рис.3. Розроблений БПЛА: а – з ФЕП та КІВС, б – технічні характеристики

Технічні характеристики розробленого БПЛА:

Злітна маса, кг	3,5
Маса планера, кг	1,5
Розмах крила, м	1,8
Довжина, м	1,6
Маса корисного навантаження, кг	≤ 2
Час польоту з вантажем 1 кг, хв.	≤ 60
Швидкість польоту, км/год	40-150
Практична стеля, м	≤ 2 000
Час підготовки до польоту, хв.	≤ 10

б)

БПЛА виконаний за літаковою схемою зі штовхаючим гвинтом має місткий фюзеляж об'ємом 2 дм<sup>3</sup>. Енергозабезпечення здійснюється від батареї ZIPPYFlightmax 5000 mAh 4S1P 30C. Використаний безколекторний електродвигун TurnigyAerodriveSK3 - 3536-1400kvBrushlessOutrunnerMotor.

Наприклад, для проведення експериментів по контролю потужності експозиційної дози (ПЕД)

використані сенсори Гейгера-Мюллера, які є пропорційними лічильниками часток іонізуючого випромінювання. Враховуючи, що події реєстрації мають випадковий за часом характер, особливо при низькій ПЕД, для згладжування результатів вимірювань використана математична фільтрація методом лінійно-зваженої ковзної середньої. GPS / ГЛОНАСС навігаційний модуль визначає географічні координати. Плата модуля КІВС (рис. 4) укладена в екрануючий корпус, час вимірювання можна встановлювати від 1 до 30 сек. В процесі вимірювання використовувався метод лінійно-зваженої ковзної середньої, а результат кожного такту знімання інформації є середнім значенням ПЕД на відрізу шляху  $S = t_{\text{вим}} \times V_{\text{оз}}$  з урахуванням попередніх  $t$  результатів ( $t_{\text{вим}}$  – час вимірювання,  $V_{\text{оз}}$  – швидкість руху БПЛА). Розроблена система відкалібрована на установці УПД-інтер в Інституті проблем безпеки АЕС НАН України. Калібрування проведене в діапазоні ПЕД від 1 мкР/год до 50 мР/год за  $^{137}\text{Cs}$ . Результати візуалізації експериментальних даних вимірювань потужності експозиційної дози наведені на рис. 5. Отримані значення величини ПЕД склали 0,05...0,11 мкЗв/год, що значно менше гранично допустимих величин. На рис. 5 представлені експериментальні дані вимірювань ПЕД у 3D-форматі. Вимірювання ПЕД проводились на висоті 100м (у південно-західному напрямку від Чорнобильської АЕС на межі зони відчуження в районі с. Потоки).



Рис. 4. Фото модуля системи дистанційного контролю потужності експозиційної дози

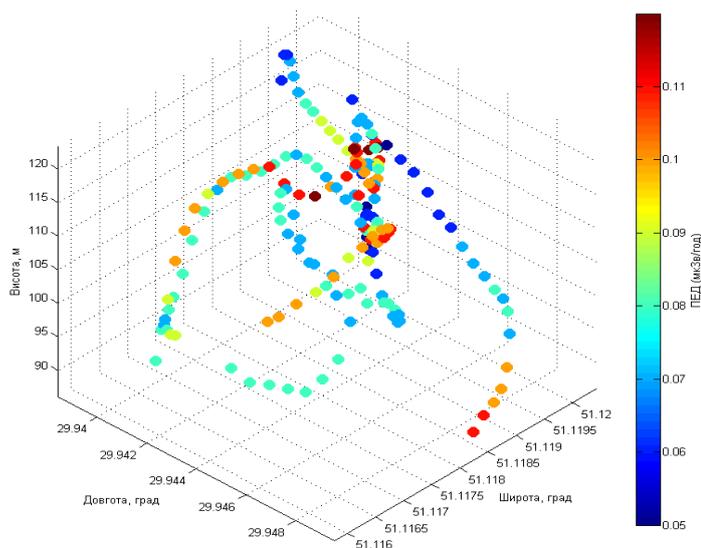


Рис. 5. 3D-графічне представлення даних вимірювань ПЕД

### Висновки

Створення нового класу мобільних систем дистанційного контролю дозвільно на базі БАК суттєво розширює можливості отримання важливої вимірюваної інформації про явища та процеси, які відбуваються в атмосфері. Особливо важлива роль таких систем при аваріях, катастрофах та інших нештатних ситуаціях.

### Література

1. Бабак В.П. Беспилотные авиационные комплексы как средство радиационного мониторинга АЭС и окружающей среды/ В.П. Бабак, В.А. Канченко, А.А. Ключников, В.А. Краснов, Н.Л. Чепур // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. - 2012. - Вип.19.- С. 60-69.
2. Статистическая диагностика электротехнического оборудования: Монография / С.В. Бабак, М.В. Мыслович, Р.М. Сысак. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. – 456 с.
3. Варганов А.З. Методы и приборы контроля окружающей среды и экологический мониторинг: [учебник] / А.З. Варганов, А.Д. Рубан, В.Л. Шкурятник. – М.: Изд-во МГУ: Горная книга, 2009. – 641 с.
4. Claudi, A. Practicl experiences and performance of monitoring systems / A. Claudi, S. Berlijn, P. Mohaupt // Cigre Session 2008, report D1-107.
5. Бурачек, В.Г. Основы геоинформационных систем / В.Г. Бурачек, О.О. Железняк, В.І. Зацерковний. -

Ніжин, ТОВ «Аспект-Поліграф», 2011. – 512 с.

6. Соколов Э.М. Автоматизированная система экологического мониторинга атмосферы при выбросах вредных веществ / Э.М. Соколов, В.М. Панарин, А.А. Зуйкова, А.В. Бизикин // Информационные технологии. - 2008. - № 4. - С. 58-61.

#### References

1. Babak V.P., Kanchenko V.A., Kluchnikov A.A., Krasnov V.A., Chepur N.L. Bepilotnye aviazionnyekompleksy kak sredstvo radiazionnogo monitoring AES i okrugayutchej sredy// Problemy bespeky atomnykh elektrostanzij i Tchornobylja. - 2012. - Vyp.19.- S. 60-69.

2. Babak V.P., Myslovich M.V., Sysak R.M. Statisticheskaja diagnostika elektrotechnicheskogo oborudovaniya: Monografija. – K.: In-t elektrodinamiki NAN Ukrainy, 2015. – 456 s.

3. Vartanov A.S., Ruban A.D., Schkuratnik V.L. Metody i pribory kontrolja okrugajuchej sredy i ekologicheskij monitoring. – M.: Isd-vo MGGU: Gornajakniga, 2009. – 641 s.

4. Claudi, A. Practicl experiences and performance of monitoring systems / A. Claudi, S. Berlijn, P. Mohaupt // Cigre Session 2008, report D1-107.

5. Burachek V.G., Gelesnjak O.O., Sazerkovnyj V.I. Osnovygeoinformazionnychsystem. - Nigyn, TOV «Aspekt-Poligraf», 2011. – 512 s.

6. Sokolov E.M., Panarin V.M., Sujkova A.A., Bisikin A.V. Avtomatisirovannaja sistema ekologicheskogo monitoringa atmosfery pri vybrosach vrednykh vetchestv// Informazionnye tehnologii. - 2008. - № 4. -S. 58-61.

Рецензія/Peer review : 23.11.2015 р.

Надрукована/Printed :15.12.2015 р.

Рецензент: д-р техн. наук, проф.Ю.В. Куц

**УДК 621.3.07**

**А.В. ЯСЬКІВ**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕМАГНІЧЕННЯ МАГНІТОМ'ЯКИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИСОКОЮ КРУТИЗНОЮ ПЕТЛІ ГІСТЕРЕЗИСУ**

*В роботі приведено результати математичного та комп'ютерного імітаційного моделювання осердя магнітного ключа з матеріалу 84КХСР, використовуючи математичні моделі магнітного гістерезису Джілса-Атертона та Джона Чана. Досліджено, що в зв'язку з обмеженнями цих моделей не можливо з достатньою точністю змоделювати процеси перемагнічення осердя. Виявлено потребу в розробці нової математичної моделі, що дозволяла б моделювати роботу магнітного ключа безпосередньо в середовищі CAD- програми.*

*Ключові слова: математична модель, високочастотний магнітний підсилювач, CAD-програма, модель магнітного гістерезису Джілса-Атертона, модель магнітного гістерезису Джона Чана*

**A.V. YASKIV**

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

## **MATHEMATICAL MODELING OF REMAGNETIZATION PROCESSES OF SOFT MAGNETIC MATERIALS WITH HIGH STEEPNESS OF HYSTERESIS LOOP**

*Abstract – The aim of the research is to explore the possibility of using existing software means for modeling power supplies based on magnetic switches in a single CAD-programme.*

*Cobalt-based soft magnetic core was modeled using Jiles-Atherton and John Chan magnetic hysteresis models in PSpice and LTspice IV respectfully. Models' limitations proved to be significant, and they cannot be used to model the remagnetization processes of magnetic switch accurately. Thus there is a need for a new mathematical model which would allow magnetic switch computer simulation in CAD-programme.*

*An equivalent circuit approach is suggested as a possible way for creation of such model.*

*Keywords: mathematical model, high frequency magnetic amplifier, CAD-programme, Jiles-Atherton model of magnetic hysteresis, John Chan model of magnetic hysteresis*

### **Вступ**

Забезпечення електроживлення радіоелектронної апаратури (РЕА) ґрунтується на принципах перетворення та регулювання параметрів електричної енергії. Зазвичай, у джерелах вторинного електроживлення (ДВЕЖ) комутаційну та регулюючу функції виконують напівпровідникові елементи. Однак, у випадках, коли необхідно реалізувати багатоканальні джерела електроживлення, забезпечити високий рівень експлуатаційних характеристик, низький рівень електромагнітних завад, як регулюючі елементи використовують високочастотні магнітні підсилювачі (ВМП) на основі сучасних магнітом'яких матеріалів з високою крутизною петлі гістерезису(коефіцієнт прямокутності  $k_r > 0.99$ ) – магнітні ключі (МК) [1,2].

Важливим етапом при розробці ДВЕЖ є комп'ютерне імітаційне моделювання. Воно здійснюється

у середовищі CAD-програми (Computer-Aided Design Programme), наприклад, PSpice, Powersim, Multisim, LabView тощо та забезпечує зменшення складності, тривалості і, як результат, зниження вартості проектування. Складність моделювання МК полягає в необхідності врахування його динамічних характеристик та магнітного гістерезису при перемагніченні осердя дроселя насичення (ДН). Криві намагнічення, або петлі гістерезису магнітних матеріалів, змінюються як функція частоти та форми сигналу прикладеного магнітного поля [3,4]. Однак, на сьогоднішній день CAD-програми не працюють з розрахунком магнітних полів і дозволяють здійснювати моделювання тільки дискретних електричних компонентів. У бібліотеках CAD-програм відсутній компонент, що враховував би нелінійні властивості ВМП і дозволяв моделювати ВМП в режимі роботи силового ключа. Математичні моделі магнітного гістерезису Прайзаха [5-8], Джіlsa-Атертона [9-12], Джона Чана [13] є статичними та не підходять для моделювання динамічних явищ. Для комп'ютерного імітаційного моделювання магнітних компонентів, зокрема осердь трансформаторів та котушок індуктивності, використовують розширені моделі гістерезису Прайзаха та Джіlsa-Атертона [14-18], що враховують залежність гістерезису від частоти, та моделі з використанням штучних нейронних мереж [19, 20]. Однак, у зв'язку з емпіричною природою цих моделей, необхідна велика кількість високоточних експериментальних даних для забезпечення їх адекватності. Також постає проблема їх інтеграції у середовище CAD-програми й узгодження з роботою її інших компонентів. Тому актуальною є задача розробки моделі магнітного ключа для його комп'ютерного імітаційного моделювання безпосередньо в середовищі CAD- програми. Її вирішення дозволило б автоматизувати процес проектування ДВЕЖ на основі МК, сприяло б оптимізації їх параметрів та виникненню нових схемотехнічних рішень.

### 1. Принцип роботи магнітного ключа

Магнітний ключ є дроселем насичення, що складається з осердя магнітного матеріалу з відносно прямокутною В-Н характеристикою (рис. 1.а)) та обмотки навколо нього [21]. Це активний компонент, що окрім комутаційної функції разом із схемою керування здійснює широтно-імпульсну модуляцію для регулювання параметрів електричної енергії в замкнутих системах електроживлення. Організація ШІМ стала можливою завдяки фундаментальній властивості матеріалу осердя МК запам'ятовувати магнітний стан при знятті зовнішніх збурень. Робочий цикл МК складається з двох півперіодів: півперіоду керування та робочого. У півперіод керування відбувається розмагнічення магнітопроводу ДН МК від рівня індукції насичення  $B_s$  до якогось рівня індукції  $B_1$  (ділянка 1-2, рис. 1.а)) у функції сигналу керування. В робочій точці 2 осердя ДН знаходиться в ненасиченому стані. Тут, у зв'язку з високою магнітною проникністю осердя, індуктивність ДН буде настільки високою, що перешкоджатиме протіканню електричного струму. На ділянці 2-3 МК знаходиться у непровідному стані. При зміні полярності вхідної напруги (робочий півперіод) перемагнічування керованого дроселя насичення почнеться із запам'ятованого рівня індукції  $B_1$ . Магнітний потік в осерді ДН зростає, доки не досягне рівня насичення (ділянка 2-3, рис. 1.а)). В насиченому стані робоча точка зміщується в 4. Тут магнітна проникність осердя ДН дуже низька, величина індуктивності настільки мала, що нею можна знехтувати, що дозволяє протікання високого струму в колі [21]. На ділянці 4-1 МК знаходиться в провідному стані. Ширина петлі гістерезису (довжина ділянки 2-3) пропорційна втратам потужності при перемагніченні ДН.

На рисунку 1.б) представлено форми сигналів вхідної високочастотної напруги  $U_2$  (як правило, напруга вторинної обмотки трансформатора), напруги  $U_{TS}$  на магнітному ключі, сили струму  $i_H$  у навантаженні. Протягом часу  $T_{off}$  МК знаходиться в непровідному стані, протягом часу  $T_{on}$  МК проводить електричний струм.

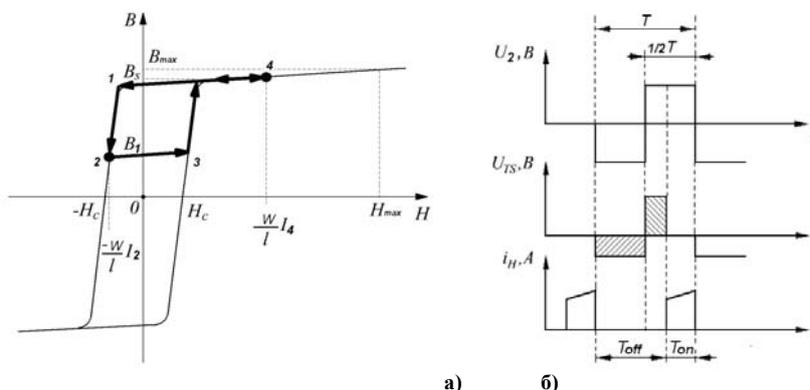


Рис. 1. а) В-Н характеристика (петля гістерезису) матеріалу осердя магнітного ключа; б) форми сигналів напруги  $U_2$  на вторинній обмотці трансформатора, напруги  $U_{TS}$  на магнітному ключі, сили струму  $i_H$  у навантаженні

Якщо осердя перемагнічується неповністю, то перемагнічування відбувається по неповній, частковій петлі гістерезису. Якщо намагнічуючий та розмагнічуючий імпульси відрізняються за величиною чи формою, то зміни В(Н) по висхідній та низхідній гілках петлі гістерезису будуть неоднаковими, петля буде несиметричною [3]. Перемагнічення МК відбувається по часткових асиметричних петлях гістерезису.

Динамічна петля гістерезису ширша від статичної. Перемагнічування осердя МК гальмують

магнітна в'язкість та вихрові струми. Магнітна в'язкість – запізнення в орієнтації доменів за напруженістю  $H$ . Вихрові струми самі створюють магнітне поле, яке, за законом магнітної індукції, зустрічне зовнішньому магнітному полю, і цим екранують внутрішні шари стрічки магнітопроводу від впливу зовнішнього поля. Вони тим менші, чим тоншою є товщина стрічки (пластини) магнітопроводу [3].

## 2. Математичне та комп'ютерне імітаційне моделювання магнітних матеріалів

Для комп'ютерного імітаційного моделювання магнітних компонентів, зокрема осердь котушок індуктивності та трансформаторів, безпосередньо в САD-програмах використовують математичні моделі магнітного гістерезису Джіlsa-Атертона та Джона Чана. Також розвивається аналогове моделювання явищ магнетизму еквівалентними схемами заміщення в дискретних електричних компонентах, зокрема RC ланками [22, 23].

Математична модель магнітного гістерезису Джіlsa-Атертона ґрунтується на врахуванні оборотного (безгістерезисного) та необоротного зміщення доменних меж [9]. При дії магнітного поля на матеріал моменти окремих доменів починають повертатися, орієнтуючись вздовж силових ліній магнітного поля. При слабких полях цей поворот супроводжується пружним прогином доменної стінки, при сильних – зміщенням границь доменів (ефект сухого тертя). Прогин стінки є оборотним процесом, тобто при знятті зовнішнього магнітного поля домен повертається у вихідний стан, не змінюючи границь. При «сухому терті» після зняття зовнішнього магнітного поля залишається внутрішня намагніченість [11]. Згідно з моделлю, загальна намагніченість  $M$  є сумою оборотної ( $M_{rev}$ ) та необоротної ( $M_{irr}$ ) її складових. Модель Джіlsa-Атертона можна представити у вигляді нелінійного диференціального рівняння [9]

$$\frac{dM}{dH} = \frac{1}{(1+c)} \cdot \frac{(M_{an} - M)}{\frac{k\delta}{\mu_0} - \alpha_w(M_{an} - M)} + \frac{c}{(1+c)} \cdot \frac{dM_{an}}{dH} \quad (1)$$

де  $M$  – намагніченість,  
 $H$  – напруженість магнітного поля,  
 $\alpha_w$  – постійна Вейса.  
 $M_{an}$  – безгістерезисна намагніченість,  
 $k$  – характеризує затримку зміщення доменних меж,  
 $c$  – коефіцієнт, що дорівнює відношенню початкової магнітної проникності  $\mu_i$  до безгістерезисної магнітної проникності  $\mu_{an}$  при  $H=0$ :

$$c = \frac{\mu_i}{\mu_{an}} \quad (2)$$

Величина  $\delta$  набуває значення  $+1$  при  $\frac{dM}{dH} > 0, M_{an} > M$  (ділянка I петлі гістерезису, рис. 2) та  $-1$  при

$\frac{dM}{dH} > 0, M_{an} < M$  (ділянка III). При  $\frac{dM}{dH} = 0, M = const, \delta = 0$  (ділянки II та IV) [11].

Числові значення  $\alpha_w, c, k$  визначаються експериментально для кожного магнітного матеріалу.

Безгістерезисну криву намагнічення можна визначити експериментальним шляхом, однак це дуже складно з технічної точки зору [17]. Щоб виміряти безгістерезисну намагніченість при заданому постійному магнітному полі  $H$  зразок магнітм'якого матеріалу слід намагнітити з розмагніченого стану до величини  $H$ , після чого провести розмагнічення під впливом змінного магнітного поля, орієнтованого полем  $H$ . Проблематичним є забезпечення точності чисельного інтегрування при вимірюванні густини магнітного потоку флюксметром під час розмагнічення матеріалу. Тому експериментально верифікувати модель без гістерезисного намагнічення можливо тільки для магнітних матеріалів з високим коефіцієнтом прямокутності петлі гістерезису (коли явищем гістерезису можна знехтувати)[24].

Проведено моделювання осердя для магнітного ключа з магнітм'якого аморфного сплаву 84КХСР, коефіцієнт прямокутності петлі гістерезису  $k_n=0,991$ . Як вихідні дані використано результати вимірювань (рис. 3.а), 4 а)), надані у Сертифікаті № 781 від 01.04.2005 на дослідний зразок типу ОЛ 50\*36\*35 заводу ООО «Завод Эллипс» [25].

Експериментально виміряні значення напруженості магнітного поля  $H$  та магнітної індукції  $B$ , що використовувались при моделюванні петлі гістерезису осердя з матеріалу 84 КХСР, наведено в таблиці 1. У діалоговому вікні *PSpice Model Editor/Hysteresis Curve* одиниця вимірювання напруженості магнітного поля – Ерстед, а магнітної індукції – Гаус. Узгодження з одиницями вимірювання системи СІ здійснюється за наступними співвідношеннями:  $1 \text{ Тл} = 10000 \text{ Гс}, 1 \text{ Е} = \frac{1000 \text{ А}}{4\pi \text{ м}}$ .

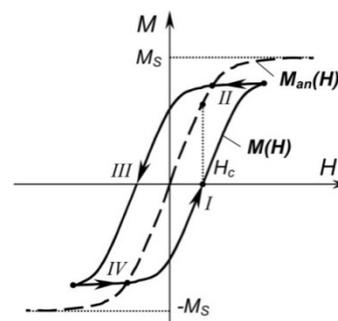


Рис. 2. Петля магнітного гістерезису за моделлю Джіlsa-Атертона [11]

Таблиця 1

**Експериментальні значення напруженості магнітного поля  $H$  та магнітної індукції  $B$**

$H, A/m$	$H, E$	$B, Tл$
0	0	0,5560
0	0	-0,5560
15,97	0,200685	0
-15,97	-0,200685	0
20,2	0,253840	0,5569
12,0	0.150796	-0,55190
-12,0	-0.150796	0,55190

Перелік параметрів моделі Джілса-Атертона у середовищі PSpice наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

**Параметри моделі Джілса-Атертона у середовищі PSpice**

Параметр	Смислове значення	Розмірність	Значення за замовчуванням	Розраховані значення
LEVEL	Рівень моделі	-	2	
GAP	Ширина повітряного зазору	см	0	0
MS	Намагніченість насичення $M_s$	A/m	1000000	480000
A	Параметр теплової енергії, характеризує форму безгістерезисної кривої намагнічення	A/m	1000	9.903
C	Параметр пружного зміщення доменних меж	-	0.2	0.1936
K	Параметр анізотропії доменів, характеризує затримку зміщення доменних меж	A/m	500	25
AREA	Середня площа поперечного перерізу осердя	см <sup>2</sup>	0.1	1.9317
PATH	Середня довжина магнітної силової лінії	см	1	13.446
PACK	Коефіцієнт заповнення осердя	-	1	1

Середовище PSpice/ PSpice Model Editor дозволяє автоматично визначати параметри  $M_s$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $K$  моделі за експериментально вимірними значеннями напруженості магнітного поля  $H$  та відповідними їм значеннями магнітної індукції  $B$  і початковою магнітною проникністю  $\mu_i$ . Однак, за наявності тільки семи експериментальних точок результат моделювання статичної петлі гістерезису був незадовільним. Тому було проведено розрахунок параметрів моделі аналогічно до наведеного у [10]. Оскільки відносна похибка моделювання все ще становила 18%, то було збільшено  $K$  до 25 A/m, чим досягнуто більшої відповідності моделі експериментальним точкам та зменшено відносну похибку до 2%. Кінцевий результат моделювання петлі гістерезису осердя з матеріалу 84 КХСР представлено на рис. 3 б).

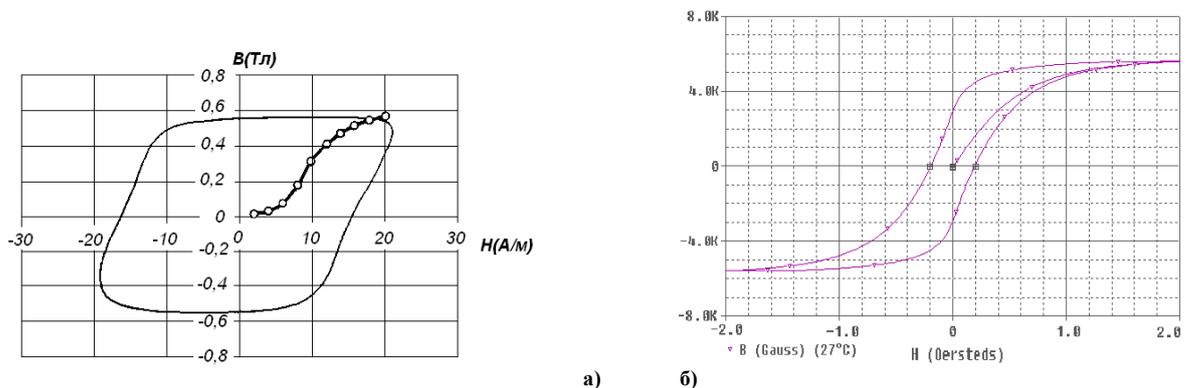


Рис. 3. Петля гістерезису осердя ДН з матеріалу 84 КХСР: а) отримана експериментально [25]; б) отримана за моделлю Джілса – Атертона в середовищі PSpice

З допомогою команди PSpice Model Editor/File/Create Capture Parts на основі змодельованої В-Н характеристики створюється компонент для комп'ютерного імітаційного моделювання осердя як складової ДН.

Математична модель гістерезису Джілса-Атертона характеризується значною обчислювальною складністю. Її параметри можна розрахувати тільки наближено, а отримати вихідні дані для розрахунку складно з технічної точки зору. В зв'язку з цим розрахунок параметрів моделі є наближеним, що призводить

до похибки моделювання. Модель є статичною і не враховує залежність втрат потужності на перемагнічення від частоти комутації.

Модель Джона Чана є значно простішою у реалізації в порівнянні з моделлю Джілса-Атертона. Вона описується меншою кількістю параметрів, при чому всі вони є довідниковими. Основна петля магнітного гістерезису складається з двох кривих: нижня крива відповідає зростаючій напруженості магнітного поля  $H$ , верхня – спадній напруженості магнітного поля.

Верхня крива задається рівнянням [13]

$$B'_+(H) = B_S \frac{(H + H_c)}{|H + H_c| + \left(\frac{B_S}{B_r} - 1\right)} \quad (3)$$

де  $B_S$  - магнітна індукція насичення,  
 $B_r$  - залишкова магнітна індукція,  
 $H_c$  - коерцитивна сила.

Нижня крива задається рівнянням [13]

$$B'_-(H) = B_S \frac{(H - H_c)}{|H - H_c| + \left(\frac{B_S}{B_r} - 1\right)} \quad (4)$$

У даній моделі крива намагнічення задається середнім значенням верхньої та нижньої кривих основної петлі магнітного гістерезису [13]:

$$B'_{mag}(H) = \frac{B'_+(H) + B'_-(H)}{2} \quad (5)$$

Для моделі характерна інверсна симетрія [13]

$$B'_+(H) = -B'_-(H) \quad (6)$$

Перелік параметрів моделі Джона Чана у середовищі LTspice IV наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

**Параметри моделі Джона Чана у середовищі LTspice IV**

Параметр	Смислове значення	Одиниці вимірювання	Значення параметрів для модельованого осердя
$H_c$	Коерцитивна сила	А*виток/м	15,97
$B_r$	Залишкова магнітна індукція	Тл	0,5519
$B_S$	Магнітна індукція насичення	Тл	0,5569
$Lm$	Довжина магнітної лінії (не включаючи ширину повітряного зазору)	м	0,13446
$Lg$	Ширина повітряного зазору	м	0
$A$	Площа поперечного перерізу осердя	м <sup>2</sup>	$1,9317 \cdot 10^{-4}$
$N$	Кількість витків	-	1

Змодельовані форми сигналів сили струму та напруги на ДН в стані насичення приведено на рис. 4 б). Для стану насичення відносна похибка при моделюванні сигналу напруги становить 5%, струму – 7,3%.

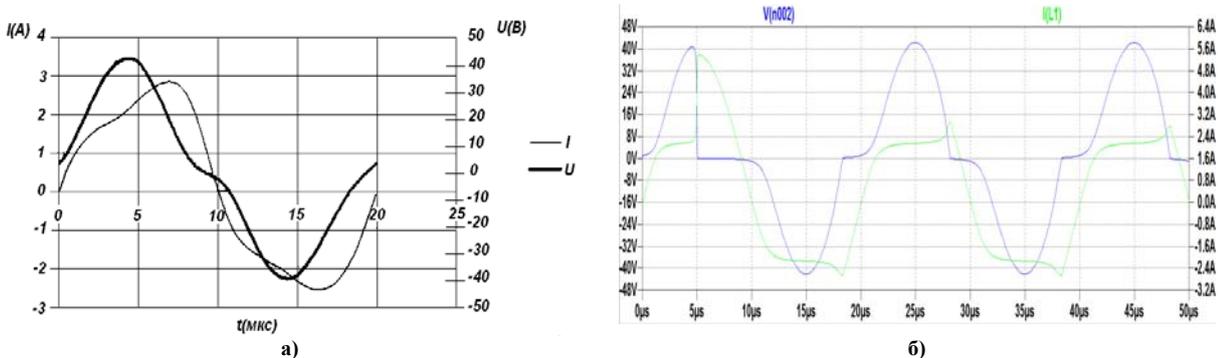


Рис. 4. Форми сигналів струму та напруги на ДН: а) отримані експериментально; б) отримані, використовуючи модель Джона Чана в середовищі LTspice IV

Як і модель Джілса-Атертона математична модель магнітного гістерезису Джона Чана не враховує частотні властивості матеріалу осердя. Вона дозволяє моделювання процесів перемагнічення тільки по симетричних петлях гістерезису. Оскільки намагнічуючі та розмагнічуючі імпульси МК часто є різними за тривалістю (а, отже петля гістерезису є частковою і асиметричною), модель не може застосовуватися для

його моделювання.

Оскільки інтегровані в CAD-програми математичні моделі магнітного гістерезису не дозволяють адекватно змоделювати процеси перемагнічення МК, доцільно дослідити можливість розробки його аналогової моделі на дискретних електричних компонентах. Важливо, щоб модель враховувала частотну залежність втрат потужності при перемагніченні осердя МК від частоти комутації, та щоб параметри цієї моделі були довідниковими.

### Висновки

У статті висвітлено проблему математичного та комп'ютерного імітаційного моделювання процесів перемагнічення магнітом'яких матеріалів з високим коефіцієнтом прямокутності петлі гістерезису. Математичні моделі магнітного гістерезису, що використовуються для комп'ютерного імітаційного моделювання мають ряд суттєвих недоліків, що не дозволяють їх використовувати для моделювання магнітних ключів. У статті приведено результати математичного моделювання процесів перемагнічення осердя для магнітного ключа з магнітом'якого матеріалу 84КХСР. Реалізовано та досліджено моделі Джілса-Атертона та Джона Чана у середовищах PSpice та LTSpice IV відповідно. Виявлено необхідність розробки математичної моделі процесів перемагнічення магнітного ключа для його комп'ютерного імітаційного моделювання безпосередньо в середовищі CAD-програми.

### Література

1. Magnetics inc. Technical Bulletin. Mag Amp Cores and Materials.
2. Vacuumschmelze GmbH & Co. KG., Tape Wound Cores for Magnetic Amplifier Chokes, Nanocrystalline VITRO-PERM 500 Z, preliminary product leaflet, 2001.
3. Л. В. Шопен. Бесконтактные электрические аппараты автоматики. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электрические аппараты». - М., «Энергия», 1976р. – 568с.
4. M. Fecioru-Morariu, A. Paduraru, and O. Caltun, “The Influence of the Frequency and Waveform on the Hysteresis Loop of some NiZnCu Ferrites,” Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 5, No. 4, December 2003, pp. 985-990.
5. F. Preisach, “Über die magnetische Nachwirkung,” Zeitschrift für Physik, vol. 94, 1935, pp. 861-890.
6. Mayergoyz, Mathematical Models of Hysteresis and Their Applications, second edition, Elsevier Science Inc., 2003. – 498 p.
7. R. C. Smith, “Smart Material Systems: Model Development,” Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 2005. – 501p.
8. Modelling, Programming and Simulations Using LabVIEW Software. Edited by Riccardo de Asmundis. Intech, Croatia, 2011. – 306p.
9. D.C. Jiles and D. L. Atherton, “Theory of Ferromagnetic Hysteresis,” J. Magn. And Magn. Mater., vol. 61, 1986, pp. 48-60.
10. Строев Н. Н. Исследование предельных возможностей использования новых магнитных материалов в высокочастотных источниках вторичного электропитания: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.09.12/ Строев Николай Николаевич.- М., 2000г.-230с.
- 10.1. А. Новиков, М. А. Амелина. Конспект лекций по курсу «Математическое моделирование в электронике». - Смоленск, 2006. – 74с.
11. L. Dupre and J. Melkebeek, “Electromagnetic hysteresis modelling: from material science to finite element analysis of devices,” International Society Compumag Newsletter, vol. 10, issue 3, 2003. – pp.4-15.
12. J. H. Chan, A. Vladimirescu, X.-C. Gao, P. Liebman, and J. Valainis, “Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation,” IEEE Transactions on Computer-Aided Design, Vol. 10, No 4, April 1991. – pp. 476 – 482.
13. D.C. Jiles, “Frequency dependence of hysteresis curves in ‘non-conducting’ magnetic materials,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 29, No. 12, 1993, pp. 3490-3492.
14. D.C. Jiles, “Frequency dependence of hysteresis curves in conducting magnetic materials,” Journal of Applied Physics, Vol. 76, No. 10, 1994, pp.5849-5855.
15. P. R. Wilson, J. N. Ross, and A. D. Brown, “Modeling Frequency-Dependent Losses in Ferrite Cores,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 3, May 2004, pp. 1537-1541.
16. R. Szewczyk and P. Frydrych, “Extension of the Jiles – Atherton Model for Modelling the Frequency Dependence of Magnetic Characteristics of Amorphous Alloy Cores for Inductive Components of Electronic Devices,” ACTA Physica Polonica A, Vol. 118, No. 5, 2010, pp. 782-784.
17. O. Özgöçenel, K. R. I. Gëuney, È. Usta, and H. Dirik, “A novel three-phase transformer hysteresis model in MATLABM Simulink,” Turk J Elec Eng & Comp Sci, Vol.20, No.4, 2012, pp. 479-492.
18. X.-H. Yuan and Q.-Y. Feng, “Behavioral Modeling of RF Power Amplifiers with Memory Effects Using Orthonormal Hermite Polynomial Basis Neural Network,” Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 34, 2013. – pp.239-251.
19. J. Konieczny, L.A. Dobrzański, B. Tomiczek, and J. Trzaska, “Application of the artificial neural networks for prediction of magnetic saturation of metallic amorphous alloys,” Archives of Materials Science and Engineering, vol. 30, issue 2, April 2008. – pp. 105-108.

20. V.Yaskiv, A.Abramovitz, K.Smedley, A.Yaskiv, "MagAmp Regulated Isolated AC-DC Converter with High Power Factor," special issue of journal COMMUNICATIONS - Scientific Letters of the University of Zilina, ISSN 1335-4205, No. 1A/2015,p. 28-34.
21. H.-G. Piao, D.-H. Kim, J.-H. Shim, and L.Q. Pan, "RC-circuit-like dynamic characteristic of the magnetic domain wall in ferromagnetic nanowires," Chinese Physics Letters, 02.2015, vol. 32(8).
22. D. M. G. Leite, A. Batagin-Neto, O. Nunes-Neto, J. A. Gymez, and C. F. O. Graeff, "Electrically detected magnetic resonance modeling and fitting: An equivalent circuit approach," Journal of Applied Physics Vol. 115, 034510 (2014); doi: 10.1063/1.4862178.
23. R. Szweczyk, "Validation of the An hysteretic Magnetization Model for Soft Magnetic Materials with Perpendicular Anisotropy," Materials, Vol. 7, p.5109-5116, 2014; doi:10.3390/ma7075109.
24. Сертифікат № 781 от 01.04.2005 на образец ОЛ 50\*36\*35, завод ООО «Завод Эллипс».

#### References

1. Magnetics inc. Technical Bulletin. Mag Amp Cores and Materials.
2. Vacuumschmelze GmbH & Co. KG., Tape Wound Cores for Magnetic Amplifier Chokes, Nanocrystalline VITRO-PERM 500 Z, preliminary product leaflet (2001)
3. L. V. Shopen, "Beskontaktnye elektricheskie apparaty avtomatiki. Uchebnik dlya studentov vuzov, obuchayushhihsya po specialnosti "Elektricheskie apparaty", M. "Energiya," 1967. – 568p.
4. M. Fecioru-Morariu, A. Paduraru, and O. Caltun, "The Influence of the Frequency and Waveform on the Hysteresis Loop of some NiZnCu Ferrites," Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 5, No. 4, December 2003, pp. 985-990.
5. F. Preisach, "Über die magnetische Nachwirkung," Zeitschrift für Physik, vol. 94, 1935, pp. 861-890.
6. Mayergoz, "Mathematical Models of Hysteresis and Their Applications, second edition," Elsevier Science Inc., 2003. – 498 p.
7. R. C. Smith, "Smart Material Systems: Model Development," Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 2005. – 501p.
8. Modelling, Programming and Simulations Using LabVIEW Software. Edited by Riccardo de Asmundis. Intech, Croatia, 2011. – 306p.
9. D.C. Jiles and D. L. Atherton, "Theory of Ferromagnetic Hysteresis," J. Magn. And Magn. Mater., vol. 61, 1986, pp. 48-60.
10. N. Stroyev, "Issledovanie predelnih vozmozhnostej ispolzovaniya novih magnitnih materialov v visokochastotnih istochnikah vtorichnogo elektropitaniya: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk: 05.09.12/ Stroyev Nikolaj Nikolayevich," M., 2000, 230s.
11. A. Novikov, M. A. Amelina, "Konspekt lekciy po kursu "Matematicheskoe modelirovanie v elektronike," Smolensk, 2006. – 74s.
12. L. Dupre and J. Melkebeek, "Electromagnetic hysteresis modelling: from material science to finite element analysis of devices," International Society Compumag Newsletter, vol. 10, issue 3, 2003. – pp.4-15.
13. J. H. Chan, A. Vladimirescu, X.-C. Gao, P. Liebman, and J. Valainis, "Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation," IEEE Transactions on Computer-Aided Design, Vol. 10, No 4, April 1991. – pp. 476 – 482.
14. D.C. Jiles, "Frequency dependence of hysteresis curves in 'non-conducting' magnetic materials," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 29, No. 12, 1993, pp. 3490-3492.
15. D.C. Jiles, "Frequency dependence of hysteresis curves in conducting magnetic materials," Journal of Applied Physics, Vol. 76, No. 10, 1994, pp.5849-5855.
- 15.1. R. Wilson, J. N. Ross, and A. D. Brown, "Modeling Frequency-Dependent Losses in Ferrite Cores," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 3, May 2004, pp. 1537-1541.
16. R. Szweczyk and P. Frydrych, "Extension of the Jiles – Atherton Model for Modelling the Frequency Dependence of Magnetic Characteristics of Amorphous Alloy Cores for Inductive Components of Electronic Devices," ACTA Physica Polonica A, Vol. 118, No. 5, 2010, pp. 782-784.
17. Ėozgoĕnenel, K. R. I. Gĕuney, Ė. Usta, and H. Dirik, "A novel three-phase transformer hysteresis model in MATLABM Simulink," Turk J Elec Eng & Comp Sci, Vol.20, No.4, 2012, pp. 479-492.
18. X.-H. Yuan and Q.-Y. Feng, "Behavioral Modeling of RF Power Amplifiers with Memory Effects Using Orthonormal Hermite Polynomial Basis Neural Network," Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 34, 2013. – pp.239-251.
19. J. Konieczny, L.A. Dobrzański, B. Tomiczek, and J. Trzaska, "Application of the artificial neural networks for prediction of magnetic saturation of metallic amorphous alloys," Archives of Materials Science and Engineering, vol. 30, issue 2, April 2008. – pp. 105-108.
20. V.Yaskiv, A.Abramovitz, K.Smedley, A.Yaskiv, "MagAmp Regulated Isolated AC-DC Converter with High Power Factor," special issue of journal COMMUNICATIONS - Scientific Letters of the University of Zilina, ISSN 1335-4205, No. 1A/2015,p. 28-34.
21. H.-G. Piao, D.-H. Kim, J.-H. Shim, and L.Q. Pan, "RC-circuit-like dynamic characteristic of the magnetic domain wall in ferromagnetic nanowires," Chinese Physics Letters, 02.2015, vol. 32(8).
22. D. M. G. Leite, A. Batagin-Neto, O. Nunes-Neto, J. A. Gymez, and C. F. O. Graeff, "Electrically detected magnetic resonance modeling and fitting: An equivalent circuit approach," Journal of Applied Physics Vol. 115, 034510 (2014); doi: 10.1063/1.4862178.
23. Szweczyk, "Validation of the An hysteretic Magnetization Model for Soft Magnetic Materials with Perpendicular Anisotropy," Materials, Vol. 7, p.5109-5116, 2014; doi:10.3390/ma7075109.
24. Сертифікат # 781 от 01.04.2005 на образец ОЛ 50\*36\*35, завод ООО «Завод Эллипс».

Рецензія/Peer review :9.12.2015 р. Надрукована/Printed :19.12.2015 р.

Рецензент: д. т. н., професор Євтух П. С.

## ПОБУДОВА ІЄРАРХІЧНОГО КЛАСИФІКАТОРА КОМП'ЮТЕРНИХ АТАК НА БАЗІ БАГАТОКАНАЛЬНИХ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ДЕТЕКТОРІВ

*Запропоновано підхід до побудови сукупного класифікатора для ієрархічної класифікації атак на інформаційні телекомунікаційні мережі на основі багатоканальних нейромережових детекторів з використанням методу головних компонент. Це дало можливість зменшити розмірність аналізованої інформації при незначній втраті інформативності за рахунок стиснення вхідної інформації для отримання найбільш інформативних ознак, а також класифікувати типи і класи атак за рахунок об'єднання навчених на певний тип атаки нейромережових детекторів. Запропонований підхід дозволив усунути конфлікти в роботі нейромережових детекторів.*

*Ключові слова: інформаційні телекомунікаційні мережі, комп'ютерні атаки, сукупний класифікатор, ієрархічна класифікація атак, нейронна мережа, багатоканальний нейромережовий детектор, метод головних компонент.*

MYROSLAV KOMAR  
Ternopil National Economic University

## CONSTRUCTION OF THE HIERARCHICAL CLASSIFIER FOR COMPUTER ATTACKS ON THE BASIS OF MULTICHANNEL NEURAL NETWORK DETECTOR

*The approach of collective classifier construction for hierarchical attacks' classification for the information telecommunication network based on multichannel neural network detector by using the method of principal components is presented. This made it possible to reduce the dimension of the analyzed data with negligible loss of information because of the input data compression for obtaining the most informative features and also to classify types and classes of attacks by combining neural network detectors trained for a certain type of attack. Proposed approach allowed to eliminate conflicts in the work of neural network detectors.*

*Keywords: information telecommunication networks, cyber attacks, collective classifier, hierarchical classification of attacks, neural network, multichannel neural network detector, method of principal components.*

### Вступ

Останнім часом відбулося злиття комп'ютерних мереж, інформаційних і телекомунікаційних технологій, що дозволило утворити сучасні інформаційні телекомунікаційні мережі (ІТМ), які є складною розподіленою системою, що характеризується наявністю множини взаємодіючих ресурсів, системних та прикладних інформаційних і телекомунікаційних процесів. У таких умовах важливою науково-технічною задачею є забезпечення цілісності, достовірності та конфіденційності інформації. Інформаційні телекомунікаційні мережі піддаються різного роду загрозам, і користувач не може бути впевнений у захищеності важливої інформації, оскільки кіберзлочинці продовжують удосконалювати і розробляти методи і засоби організації мережових атак.

Одним з гучних злочинів у сфері інформаційної безпеки, на думку експертів видання Forbes [1] стала атака Anonymous на платіжні системи MasterCard, Visa і Paypal, коли ті в кінці 2010 року відмовилися приймати платежі для сайту WikiLeaks. Втрати від атаки склали \$5,5 млн. Ще одним гучним злочином була атака на Citibank в червні 2011 року. Тоді хакери викрали \$2,7 млн. з рахунків 3400 клієнтів банку.

Таким чином, пошук та реалізація підходів забезпечення цілісності, достовірності та конфіденційності інформації є важливою науково-технічною задачею.

### Постановка задачі

Залежно від техніки, що використовується при здійсненні несанкціонованих дій на комп'ютерну систему, виділяють чотири основні класи мережових атак (denial of service, user-to-root, remote-to-local, probe), кожен з яких складається з декількох типів [2]. DOS (denial of service, відмова в обслуговуванні) атаки. Це мережові атаки, направлені на виникнення ситуації, коли в системі, що атакується, відбувається відмова в обслуговуванні. Дані атаки характеризуються генерацією великого об'єму трафіку, що приводить до перевантаження і блокування сервера. Виділяють шість типів DOS-атак: back, land, neptune, pod, smurf, teardrop. U2R (user-to-root) атаки передбачають отримання зареєстрованими користувачами привілеїв локального суперкористувача (адміністратора). Виділяють чотири типи U2R-атак: buffer\_overflow, loadmodule, perl, rootkit. R2L (remote-to-local) атаки характеризуються отриманням доступу незареєстрованого користувача до комп'ютера з боку віддаленої машини. Виділяють вісім типів R2L-атак: ftp\_write, guess\_passwd, imap, multihop, phf, spy, warezclient, warezmaster. Probe-атаки ґрунтуються на процесі сканування мережових портів віддаленої машини з метою отримання конфіденційної інформації. Виділяють чотири типи Probe-атак: ipsweeper, nmap, portsweeper, satan [2].

Виявлення і класифікація мережових атак на комп'ютерну систему відбувається на основі аналізу інформації, що передається по каналах передачі даних ІТМ. Виділяють 41 параметр мережного з'єднання, які, у свою чергу, об'єднані у три групи: вбудовані параметри, параметри контенту, параметри трафіку [2].

Для вирішення задачі виявлення і класифікації атак на ІТМ на основі аналізу мережового трафіку

розроблено досить багато підходів, зокрема з використанням штучних нейронних мереж. Аналіз відомих публікацій [3–15], а також проведені експериментальні дослідження [16–17] показують здатність запропонованих підходів виявляти мережеві атаки.

Проте, частина атак залишаються такими, що практично не детектуються. Багато в чому це виникає унаслідок того, що база з'єднань KDD-99 [2], яка використовується для тестів містить недостатню кількість записів про ці атаки і, відповідно, дані, на яких можна навчити нейронну мережу. Для того, щоб поліпшити якість навчання нейронних мереж на «рідкісних» типах атак, пропонується використовувати метод головних компонент [18, 19] для скорочення розміру інформації при навчанні та аналізі мережевого трафіку.

### Основна частина

Метод головних компонент (principal component analysis, PCA) [18, 19] є одним з основних способів зменшення розмірності даних при мінімальній втраті інформації. Для визначення числа головних компонент запропоновано використати критерій відносної інформативності

$$J = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n}, \quad (1)$$

де  $\lambda_i$  – кількість інформації в  $i$ -й компоненті.

Аналізуючи за допомогою формули (1) розподіл кількості інформації, що міститься в кожній подальшій компоненті  $n$ , визначається число головних компонент  $p$ , які доцільно використовувати для подальшого аналізу без істотної втрати відносної інформативності  $J$ .

Сукупним нейромережевим детектором є такий детектор, який складається з множини нейромережевих детекторів, кожен з яких навчений на певному типі атак, що дозволяє детектувати клас і тип атаки. Оскільки виділяють 22 різновиди мережевих атак, які об'єднані в чотири класи (*DoS*, *U2R*, *R2L* і *Probe*) [2], то для побудови сукупного класифікатора використовуються 22 нейромережевих детектори, які навчені на виявлення кожного з 22 різновидів мережевих атак.

Узагальнену схему функціонування сукупного нейромережевого детектора для виявлення мережевих атак з використанням методу головних компонент можна представити таким чином (рис. 1).

При такому підході, кількість  $n$  вхідних нейронів нейронної мережі, що використовується в якості детектора, дорівнює 12. Вхідною інформацією є 12 перших головних компонент, які подаються на 22 нейромережеві детектори, де і відбувається її визначення до класу мережевої атаки або до класу нормального з'єднання.

На рис. 2 представлений приклад схеми побудови сукупного класифікатора для ієрархічної класифікації атак, який базується на стисненні інформації з використанням методу головних компонент і на такому об'єднанні нейромережевих детекторів, щоб нейтралізувати конфлікти між ними. Для нейтралізації конфліктів між детекторами використовується евклідова відстань між вхідним образом і ваговими векторами нейронів-переможців кожного з детекторів. Детектор, який має мінімальну евклідову відстань, є переможцем в конкурентній боротьбі і визначає клас і тип атаки.

Розглянемо функціонування сукупного класифікатора. Стиснений набір вхідних даних розмірністю 12 поступає на нейромережеві детектори, кожен з яких навчений на відповідний тип атак. В результаті, якщо детектор виявляє атаку, то вихідне значення його першого виходу встановлюється в одиничне значення. Для усунення конфліктів в роботі такого класифікатора, коли декілька детекторів встановлюються в одиничний стан, на другий вихід кожного детектора передається мінімальна евклідова відстань між вхідним образом і ваговими векторами відповідного детектора:

$$E_j = \min_j D_j = \min_i \sqrt{(x_1 - w_{1j})^2 + (x_2 - w_{2j})^2 + \dots + (x_{12} - w_{12j})^2}. \quad (2)$$

Інформація про мінімальну евклідову відстань поступає з кожного детектора на арбітра, який визначає детектор з номером  $k$ , що має мінімальну евклідову метрику:

$$E_k = \min E_j, j = \overline{1,22}. \quad (3)$$

В результаті  $k$ -й вихід арбітра встановлюється в одиничний стан, а решта виходів – в нульовий стан:

$$Z_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i = k \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}. \quad (4)$$

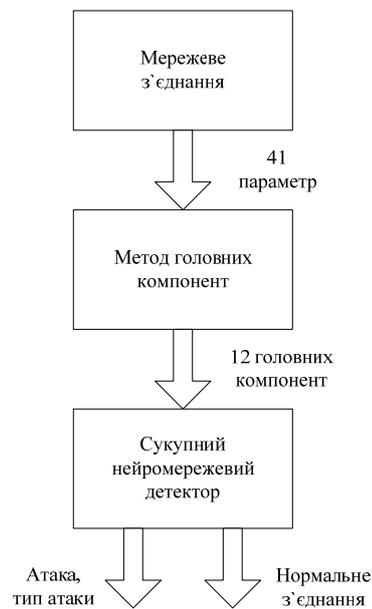


Рис. 1. Взаємодія PCA і сукупного нейромережевого детектора

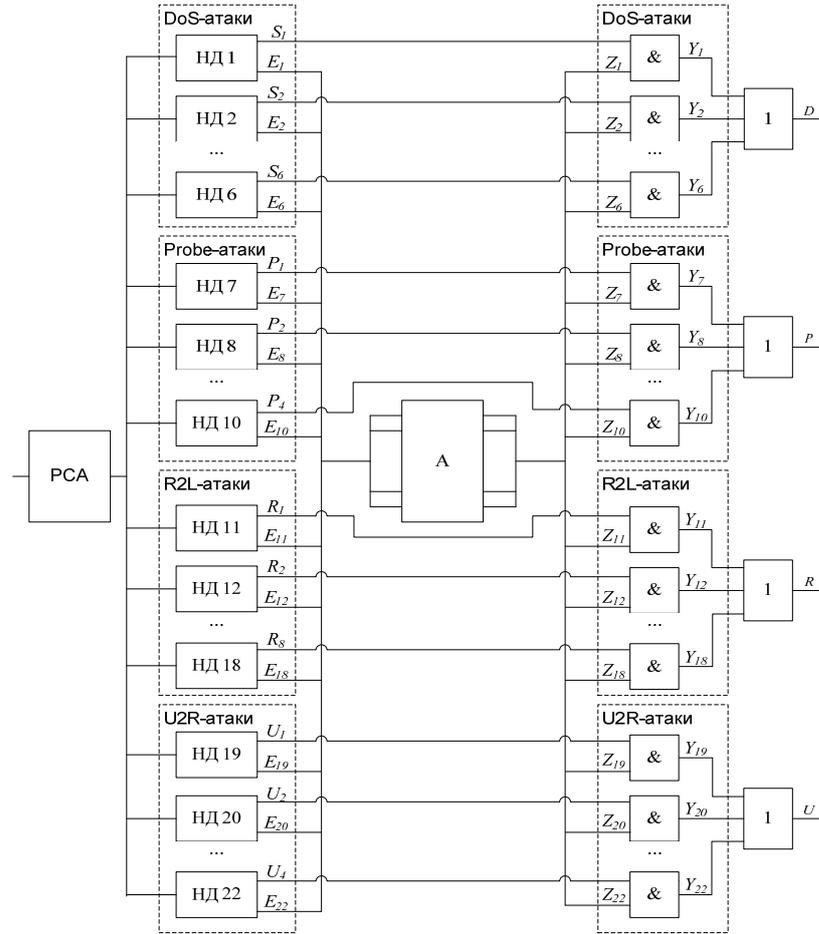


Рис. 2. Схема сукупного класифікатора для ієрархічної класифікації атак на ІТМ

На виходах логічних елементів «І» визначається тип атаки:

$$Y_i = F_i Z_i, \tag{5}$$

де 
$$F_i = \begin{cases} S_i, \text{ якщо } i = \overline{1,6} \\ P_i, \text{ якщо } i = \overline{7,10} \\ R_i, \text{ якщо } i = \overline{11,18} \\ U_i, \text{ якщо } i = \overline{19,22} \end{cases}$$

Виходи логічних елементів «АБО» визначають клас атаки:

$$D = \bigvee_{i=1}^6 Y_i, \quad P = \bigvee_{i=7}^{10} Y_i, \quad R = \bigvee_{i=11}^{18} Y_i, \quad U = \bigvee_{i=19}^{22} Y_i, \tag{6}$$

де  $D$  – DoS-атака;  $P$  – Probe-атака;  $R$  – R2L-атака;  $U$  – U2R-атака.

На рисунку 3 представлений розподіл в тривимірному просторі перших головних компонент різних мережових атак і нормальних з'єднань, що візуально демонструє взаємозв'язок між даними, які розглядаються.

Як видно з рис. 3, даний розподіл має нелінійний характер. Застосування методу головних компонент для зменшення розмірності даних, що описують мережовий трафік, показало, що, одна головна компонента містить 52,40% інформації, дві головних компоненти містять вже 71,67% інформації, три – 88,37% і т. д. Перших 12 головних компонент містять більше 99% інформації про мережовий трафік. У останніх 30 компонентах міститься менше 1% інформації, і, з міркування доцільності, їх можна виключити з аналізу [20].

Результати експериментальних досліджень показали, що при використанні методу головних компонент для попередньої обробки інформації про мережові з'єднання, достовірність виявлення атак на ІТМ підвищується. Структура нейронної мережі у випадку використання PCA – 12-10-2 (12 вхідних нейронів, 10 нейронів прихованого шару і 2 вихідних нейрона). Отримані результати представлені в таблиці 1.

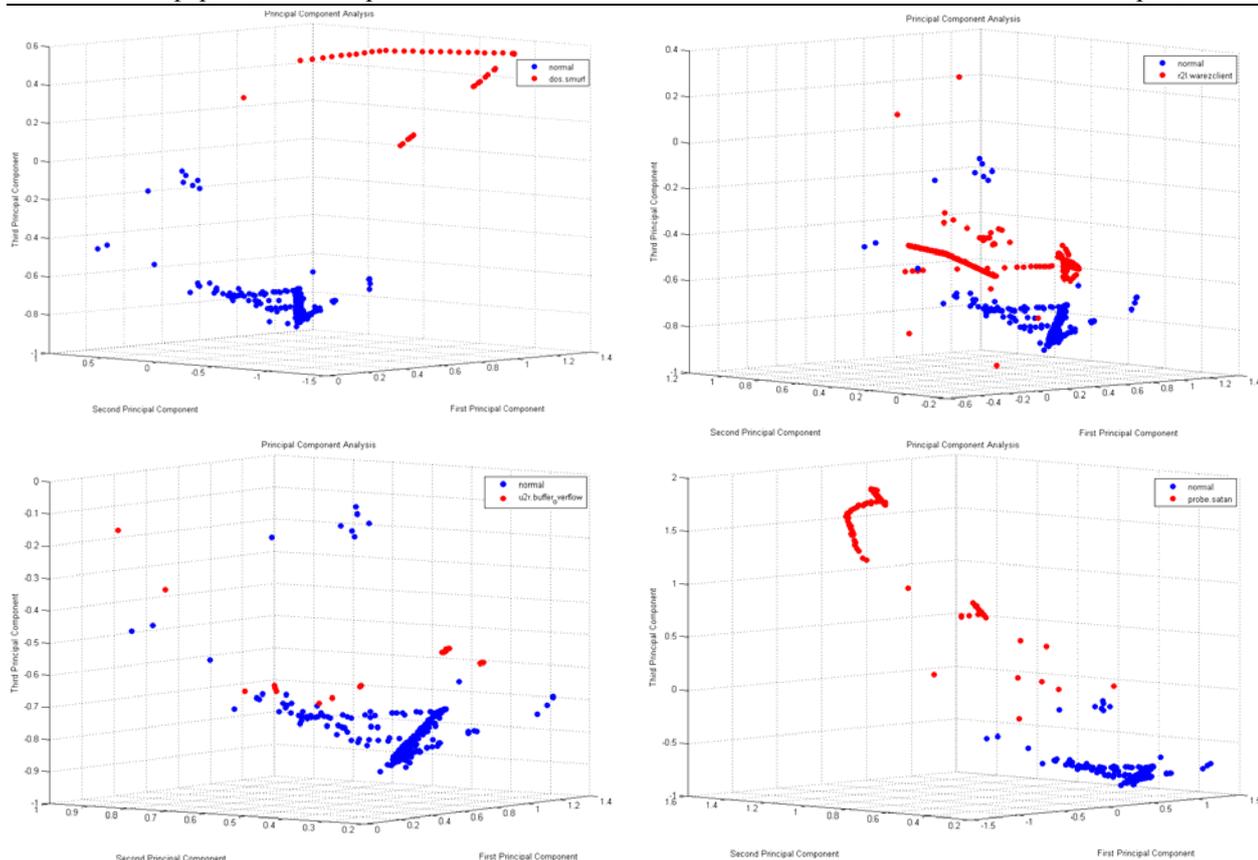


Рис. 3. Розподіл мережних атак і нормальних з'єднань

Таблиця 1

**Порівняльний аналіз результатів виявлення атак**

Атака	без PCA, %	PCA, %	Відхилення, %
DoS_Back	99,5	99,5	0,0
DoS_Land	90,5	100,0	+9,5
DoS_Neptune	100,0	100,0	0,0
DoS_Pod	98,1	98,1	0,0
DoS_Smurf	100,0	100,0	0,0
DoS_Teardrop	100,0	100,0	0,0
Probe_Ipsweep	7,1	65,2	+58,1
Probe_Nmap	54,5	100,0	+45,5
Probe_PortswEEP	99,6	99,9	+0,3
Probe_Satan	99,3	99,3	0,0

Таким чином, для успішного аналізу мережевого трафіку досить використовувати 12 перших головних компонент, в яких міститься більше 99% інформації про мережеве з'єднання, а не 41 параметр. Це дозволяє істотно прискорити як процес навчання нейромережевого детектора, так і процес аналізу мережевого трафіку. Для цього, до виділених з мережевого трафіку даних необхідно застосувати спочатку метод головних компонент, а потім подати отримані дані на вхід нейронної мережі.

Отже, застосування методу головних компонент дозволило зменшити розмірність аналізованої інформації в 3,4 рази при втраті інформативності 0,8%.

**Висновки**

Запропоновано підхід до побудови сукупного класифікатора для ієрархічної класифікації атак на ІТМ на основі багатоканальних нейромережевих детекторів, що дало можливість зменшити розмірність аналізованої інформації в 3,4 рази при втраті інформативності 0,8% за рахунок стиснення вхідної інформації на основі методу головних компонент для отримання найбільш інформативних ознак, а також класифікувати типи і класи атак за рахунок об'єднання навчених на певний тип атаки нейромережевих детекторів. Запропонований підхід дозволив усунути конфлікти в роботі нейромережевих детекторів.

**Література**

1. Рейтинг наиболее громких кибератак последнего времени [Електронний ресурс]. – Режим

доступу: <http://internetua.com/sostavlen-reiting-naibolee-gromkih-kiberatak-poslednego-vremeni> – Назва з екрану.

2. KDD Cup 1999 Data [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html> – Назва з екрану.
3. Cannady J. Artificial neural networks for misuse detection / J. Cannady // Proceedings of the 21st national information systems security conference. – Arlington (USA), 1998. – P. 368-381.
4. Mukkamalaa S. Intrusion detection using an ensemble of intelligent paradigms / Mukkamalaa, A.H. Sung, A. Abraham // Journal of Network and Computer Applications. – 2005. – Vol. 28(2). – P.167-182.
5. Lorenzo-Fonseca I. Intrusion detection method using neural networks based on the reduction of characteristics / I. Lorenzo-Fonseca, F. Maciá-Pérez, F. Mora-Gimeno [et al.] // LNCS. – 2009. – Vol. 5517. – P. 1296-1303.
6. Grediaga A. Application of neural networks in network control and information security / A. Grediaga, F. Ibarra, F. García [et al.] // LNCS. – 2006. – Vol. 3973. – P. 208-213.
7. Zhang C. Comparison of BPL and RBF Network in intrusion detection system / C. Zhang, J. Jiang, M. Kamel // LNCS (LNAI). – 2004 – Vol. 2639. – P.460-470.
8. Cannady J. Applying CMAC-based online learning to intrusion detection / J. Cannady // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). – 2000. – Vol. 5. – P. 405-410.
9. Debar H. A neural network component for an intrusion detection system / H. Debar, M. Becker, D. Siboni // IEEE Computer Society Symposium on Research in Security and Privacy. – 1992. – P.240-250.
10. Cheng E. Network-based anomaly detection using an Elman network / E. Cheng, H. Jin, Z. Han, J. Sun // Networking and Mobile Computing, Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin/Heidelberg. – 2006. – Vol. 3619. – P. 471-480.
11. Höglund A.J. A computer host-based user anomaly detection system using the self-organizing map / A.J. Höglund, K. Hätönen, A.S. Sorvari // Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'00). – 2000. – Vol. 5. – P. 411-416.
12. Ramadas M. Detecting anomalous network traffic with self-organizing maps / M. Ramadas, S. Ostermann, B. Tjaden // LNCS. – 2003. – Vol. 2820. – P.36-54.
13. Sarasamma S.T. Hierarchical Kohonen net for anomaly detection in network security / S.T. Sarasamma, Q.A. Zhu, J. Huff // IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics. – Part B 35 (2). – 2005. – P. 302-312.
14. Jirapummin C. Hybrid neural networks for intrusion detection system / C. Jirapummin, N. Wattanapongsakorn, P. Kanthamanon // Proceedings of the 2002 International Technical Conference On Circuits/Systems, Computers and Communications, Thailand. – 2002. – P. 928-931.
15. Horeis T. Intrusion detection with neural networks – Combination of self-organizing maps and radial basis function networks for human expert integration / T. Horeis // Tech. report, University of Passau, 2003 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.106.191&rep=rep1&type=pdf> – Назва з екрану.
16. Комар М.П. Методы искусственных нейронных сетей для обнаружения сетевых вторжений / М.П. Комар // Збірник тез сьомої Міжнародної науково-технічної конференції «Інтернет – Освіта – Наука» (ІОН-2010). – Вінниця (Україна), 2010. – С. 410–413.
17. Комар М.П. Система анализа сетевого трафика для обнаружения компьютерных атак / М.П. Комар // Вестник Брестского государственного технического университета: (Серия: физика, математика и информатика). – 2010. – №5. – С. 14–16.
18. Jolliffe I. Principal component analysis / I.T. Jolliffe. – Springer, 2010. – 516 p.
19. Shilpa Lakhina. Feature Reduction using Principal Component Analysis for Effective Anomaly-Based Intrusion Detection on NSL-KDD / Shilpa Lakhina, Sini Joseph, Bhupendra Verma // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2010. – Vol.2, № 6. – P. 1790–1799.
20. Komar M. Intelligent system for detection of networking intrusion / M. Komar, V. Golovko, A. Sachenko, S. Bezobrazov // Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS-2011). – Prague (Czech Republic), 2011. – Vol.1. – P. 374-377.

#### References

1. Rating of the largest recent cyber attacks [Electronic resource]. – Mode of access: <http://internetua.com/sostavlen-reiting-naibolee-gromkih-kiberatak-poslednego-vremeni> – Title from the screen (In Russian).
2. KDD Cup 1999 Data [Electronic resource]. – Mode of access: <http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html> – Title from the screen.
3. Cannady J. Artificial neural networks for misuse detection / J. Cannady // Proceedings of the 21st national information systems security conference. – Arlington (USA), 1998. – P. 368-381.
4. Mukkamalaa S. Intrusion detection using an ensemble of intelligent paradigms / Mukkamalaa, A.H. Sung, A. Abraham // Journal of Network and Computer Applications. – 2005. – Vol. 28(2). – P.167-182.
5. Lorenzo-Fonseca I. Intrusion detection method using neural networks based on the reduction of characteristics / I. Lorenzo-Fonseca, F. Maciá-Pérez, F. Mora-Gimeno [et al.] // LNCS. – 2009. – Vol. 5517. – P. 1296-1303.
6. Grediaga A. Application of neural networks in network control and information security / A. Grediaga, F. Ibarra, F. García [et al.] // LNCS. – 2006. – Vol. 3973. – P. 208-213.

7. Zhang C. Comparison of BPL and RBF Network in intrusion detection system / C. Zhang, J. Jiang, M. Kamel // LNCS (LNAI). – 2004 – Vol. 2639. – P.460-470.
8. Cannady J. Applying CMAC-based online learning to intrusion detection / J. Cannady // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). – 2000. – Vol. 5. – P. 405-410.
9. Debar H. A neural network component for an intrusion detection system / H. Debar, M. Becker, D. Siboni // IEEE Computer Society Symposium on Research in Security and Privacy. – 1992. – P.240-250.
10. Cheng E. Network-based anomaly detection using an Elman network / E. Cheng, H. Jin, Z. Han, J. Sun // Networking and Mobile Computing, Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin/Heidelberg. – 2006. – Vol. 3619. – P. 471-480.
11. Höglund A.J. A computer host-based user anomaly detection system using the self-organizing map / A.J. Höglund, K. Hätönen, A.S. Sorvari // Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'00). – 2000. – Vol. 5. – P. 411-416.
12. Ramadas M. Detecting anomalous network traffic with self-organizing maps / M. Ramadas, S. Ostermann, B. Tjaden // LNCS. – 2003. – Vol. 2820. – P.36-54.
13. Sarasamma S.T. Hierarchical Kohonen net for anomaly detection in network security / S.T. Sarasamma, Q.A. Zhu, J. Huff // IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics. – Part B 35 (2). – 2005. – P. 302-312.
14. Jirapummin C. Hybrid neural networks for intrusion detection system / C. Jirapummin, N. Wattanapongsakorn, P. Kanthamanon // Proceedings of the 2002 International Technical Conference On Circuits/Systems, Computers and Communications, Thailand. – 2002. – P. 928-931.
15. Horeis T. Intrusion detection with neural networks – Combination of self-organizing maps and radial basis function networks for human expert integration / T. Horeis // Tech. report, University of Passau, 2003 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.106.191&rep=rep1&type=pdf> – Title from the screen.
16. Komar M. Methods of artificial neural networks for network intrusion detection / M. Komar // Proceedings of the Seventh International Scientific Conference "Internet - Education - Science - 2010", - Vinnitsa (Ukraine). – 2010. – P. 410-413 (In Ukrainian).
17. Komar M. System for analyzing network traffic to detect computer attacks / M. Komar // Herald Brest State Technical University. Physics, mathematics, computer science. – 2010. – №5. – P. 14-16 (In Russian).
18. Jolliffe I. Principal component analysis / I.T. Jolliffe. – Springer, 2010. – 516 p.
19. Shilpa Lakhina. Feature Reduction using Principal Component Analysis for Effective Anomaly-Based Intrusion Detection on NSL-KDD / Shilpa Lakhina, Sini Joseph, Bhupendra Verma // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2010. – Vol. 2, № 6. – P. 1790-1799.
20. Komar M. Intelligent system for detection of networking intrusion / M. Komar, V. Golovko, A. Sachenko, S. Bezobrazov // Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS-2011). – Prague (Czech Republic), 2011. – Vol.1. – P. 374-377.

Рецензія/Peer review : 13.11.2015 р.

Надрукована/Printed :15.12.2015 р.

УДК 004.94

В.Д. ДМИТРИЕНКО, С.Ю. ЛЕОНОВ, В.А. БРЕЧКО  
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

## МНОГОНАПРАВЛЕННАЯ АССОЦИАТИВНАЯ ПАМЯТЬ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*На основе архитектуры и алгоритмов функционирования нейронной сети двунаправленная ассоциативная память разработана многонаправленная ассоциативная память, способная запоминать и восстанавливать из памяти по входному изображению N ассоциативных ему изображений, по каждому из которых может быть восстановлено входное изображение. Приведены архитектура и алгоритмы функционирования новой нейронной сети на биполярных нейронах при черно-белых входных изображениях. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.*

**Ключевые слова:** двунаправленная ассоциативная память, многонаправленная ассоциативная память, нейронная сеть, архитектура, алгоритмы функционирования.

V.D. DMITRIENKO, S.YU. LEONOV, V.A. BRECHKO  
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"

## MULTIDIRECTIONAL ASSOCIATIVE MEMORY BASED ON NEURAL NETWORKS

**Abstract.** *Based on the architecture and functioning of the neural network algorithms for bidirectional associative memory developed multidirectional associative memory, the ability to memorize and restore the memory of the input image N associative it images, each of which can be restored by the input image. The architecture and algorithms for operation of the new neural network bipolar neurons in the black and white of the input image is given.*

**Keywords:** *bidirectional associative memory, a one-way associative memory, neural network, architecture, algorithms operation.*

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Одной из характерных особенностей человеческого мозга является распределенная по пространству мозга память, функционирующая на основе механизмов ассоциаций [1 – 3]. Высокая эффективность запоминания, хранения и обработки информации человеком на основе ассоциативности, вызывает в течение десятилетий интенсивные научные исследования в этой области. Одним из инструментов исследований является математическое моделирование процессов, происходящих в биологических нейронных сетях мозга человека, в частности, с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) [2 – 8]. С помощью ИНС моделируются два основных вида ассоциативной памяти – автоассоциативная и гетероассоциативная [1, 5. 8]. Автоассоциативная память предполагает запоминание искусственной нейронной сетью образов, а затем использование нейронной сети для распознавания зашумленных или неполных представлений хранимых в памяти образов. В отличие от

автоассоциативной памяти, в гетероассоциативной памяти набору входных образов соответствует качественно другой набор. Большинство ИНС можно рассматривать как разновидности гетероассоциативной памяти.

В качестве примера рассмотрим перцептроны [1 – 5] – нейронные сети, имеющие входной слой  $X = (X_1, \dots, X_n)$  нейронов, один или несколько скрытых  $Z$ -слоев элементов и выходной слой  $Y = (Y_1, \dots, Y_m)$  элементов. Такие перцептроны реализуют отображения вида  $y^q = \varphi(x^q)$ , где  $y^q = (y_1^q, y_2^q, \dots, y_m^q)$  – выходной вектор  $Y$ -слоя сети для  $q$ -го входного вектора перцептрона  $x^q = (x_1^q, x_2^q, \dots, x_n^q)$ ;  $q = \overline{1, L}$ ;  $L$  – число пар векторов  $(x^q, y^q)$ ,  $x^q \in R^n$ ,  $y^q \in R^m$ , ассоциативного списка. При этом выходные векторы могут рассматриваться как ассоциации входным векторам, а в случае бинарных выходных нейронов могут использоваться для определения адреса в памяти компьютера по входному вектору  $x^q$  [9], однако такая адресация памяти не получила широкого распространения из-за сложностей обучения многослойных перцептронов, которые обладают и другим недостатком – не могут по выходным векторам определять ассоциативные входные векторы.

Альтернативой перцептронам может служить двунаправленная ассоциативная память (ДАП), которая имеет простые алгоритмы обучения и архитектура которой определяется двумя слоями нейронов, связанных двунаправленными взвешенными связями [2, 3, 8]. В ДАП любой слой нейронов может быть как входным, так и выходным. Благодаря этому любой вектор из пар векторов  $(x^q, y^q)$ ,  $q = \overline{1, L}$  ассоциативного списка, запомненных ДАП, может использоваться для определения ассоциативного ему вектора.

В ДАП каждому входному вектору (изображению) сохраняется только одно ассоциативное ему выходное изображение (вектор), то есть отсутствует возможность сохранения и восстановления из памяти сети нескольких ассоциативных входному вектору изображений. Подобное ограничение характерно и для многослойной двунаправленной ассоциативной памяти, способной запоминать и восстанавливать отдельные цепочки ассоциаций как по входному, так и по выходному векторам [10, 11], однако не способной входному изображению сопоставлять несколько различных цепочек ассоциаций.

**Целью настоящей статьи** является разработка на основе нейронных сетей ассоциативной памяти, способной запоминать и восстанавливать по входному вектору  $N$  ассоциативных ему выходных векторов.

**Основная часть. Архитектура и алгоритмы функционирования  $N$ -направленной ассоциативной памяти.**

Архитектура  $N$ -направленной ассоциативной памяти получается из архитектуры двунаправленной ассоциативной памяти (рис. 1) [2, 3, 8] путем введения в ее архитектуру дополнительных  $(N - 1)$  сенсорных  $B$ -слоев нейронов, связанных с первым слоем сенсорных  $A$ -нейронов парами двунаправленных взвешенных связей с соответствующими весовыми коэффициентами (рис. 2). В обеих нейронных сетях при биполярных входных изображениях (векторах) функции активации всех нейронов задаются соотношением

$$U_{\text{вых.}p}(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{\text{вх.}p}(t) > \theta_p, \\ U_{\text{вых.}p}(t), & \text{если } U_{\text{вх.}p}(t) = \theta_p, \\ 0, & \text{если } U_{\text{вх.}p}(t) < \theta_p, \end{cases}$$

где  $U_{\text{вых.}p}(t+1)$  – выходной сигнал  $p$ -го нейрона в момент времени  $(t+1)$ ;  $U_{\text{вх.}p}(t)$  – входной сигнал  $p$ -го нейрона в момент времени  $t$ ;  $\theta_p$  – порог  $p$ -го нейрона.

Предлагаемая нейронная сеть состоит из сенсорного слоя элементов  $A_j$  ( $j = \overline{1, n}$ ) и  $N$  выходных полей нейронов:  $B_{k1}^1$  ( $k1 = \overline{1, m1}$ ),  $B_{k2}^2$  ( $k2 = \overline{1, m2}$ ), ...,  $B_{kN}^N$  ( $kN = \overline{1, mN}$ ), элементы которых связаны парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами  $w_{j,k1}^{11}$ ,  $w_{k1,j}^{12}$  ( $j = \overline{1, n}$ ;  $k1 = \overline{1, m1}$ );  $w_{j,k2}^{21}$ ,  $w_{k2,j}^{22}$  ( $j = \overline{1, n}$ ;  $k2 = \overline{1, m2}$ ), ...,  $w_{j,kN}^{N1}$ ,  $w_{kN,j}^{N2}$  ( $j = \overline{1, n}$ ;  $kN = \overline{1, mN}$ ), соответствующими парам соединяемых нейронов. Здесь первые верхние индексы весовых коэффициентов указывают на номер выходного поля, с которым соединен  $A$ -слой элементов, а второй верхний индекс (1 или 2) указывает на направление передачи сигналов. Если он равен "1", то сигнал передается из слоя  $A$ -нейронов к полю  $B$ -нейронов, если второй верхний индекс равен двум, то сигнал передается из слоя  $B$ -элементов на входы  $A$ -элементов. Первые нижние индексы весовых коэффициентов связей указывают на нейроны, выдающие выходные сигналы, а вторые нижние индексы указывают на нейроны, воспринимающие сигналы.

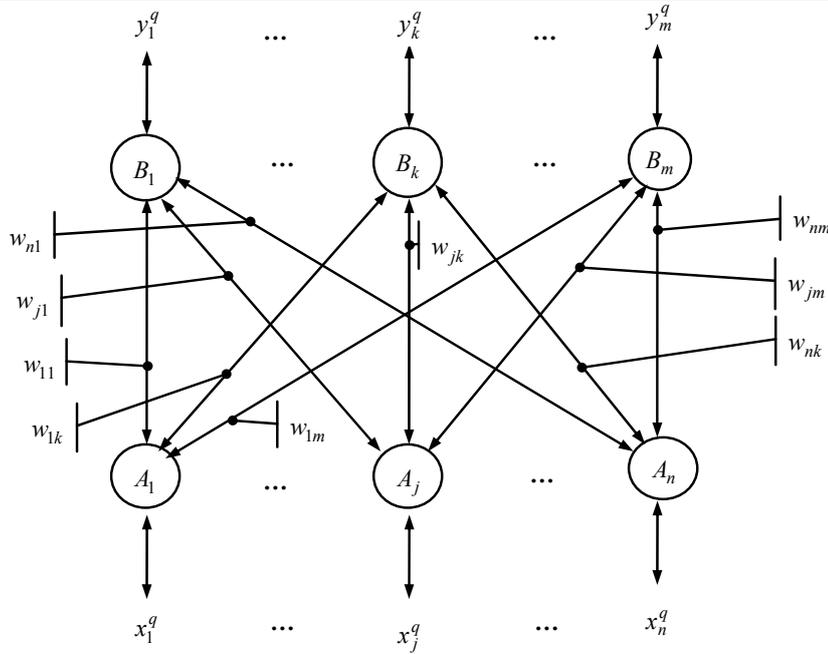


Рис. 1. Архитектура двунаправленной ассоциативной памяти

$A_1, \dots, A_j, \dots, A_n$  – нейроны первого сенсорного слоя элементов сети;  $B_1, \dots, B_k, \dots, B_m$  – элементы второго сенсорного слоя нейронов сети;  $x_1^q, \dots, x_j^q, \dots, x_n^q, y_1^q, \dots, y_k^q, \dots, y_m^q$  – соответственно векторы входных  $x^q$  и выходных  $y^q$  сигналов сети в случае, когда  $A$ -слой элементов является входным, а  $B$ -слой – выходным;  $w_{11}, \dots, w_{1k}, \dots, w_{nk}, \dots, w_{nm}$  – веса связей, передающих сигналы из  $A$ -слоя в  $B$ -слой элементов.

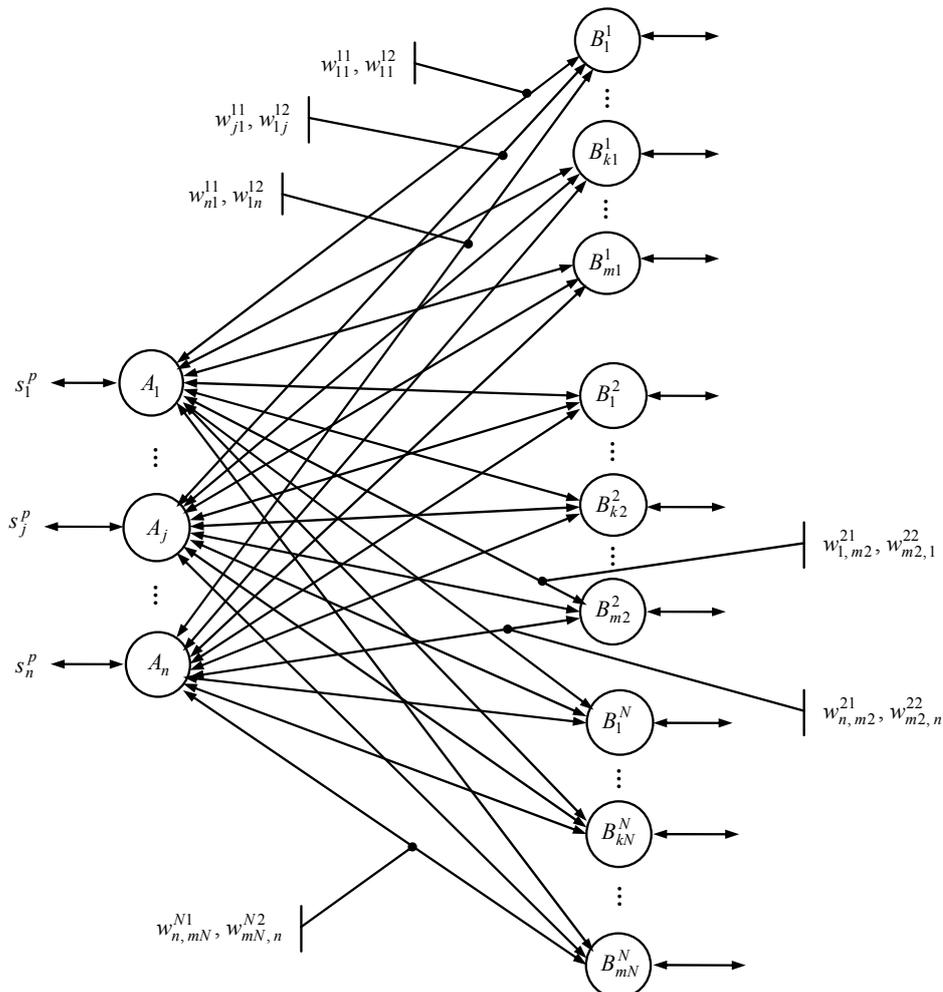


Рис. 2. Архитектура  $N$ -направленной ассоциативной памяти

Разработанная  $N$ -направленная ассоциативная память должна обеспечивать запоминание исходной информации и определение ассоциативных векторов (изображений) по входным векторам (изображениям). Процесс запоминания информации сводится к вычислению  $N$  матриц весовых коэффициентов связей, передающих сигналы от входного  $A$ -слоя нейронов ко входам  $N$  полей  $B$ -нейронов. Поскольку слой  $A$ -нейронов и любое из  $N$  полей  $B$ -нейронов является двунаправленной ассоциативной памятью, то для вычисления матриц  $W^q$   $q = \overline{1, N}$  весов связей можно воспользоваться известным из теории ДАП соотношением [2, 3, 8], модифицированным для вычисления весов связей  $N$ -направленной ассоциативной памяти:

$$w_{j,kq}^{q1} = \sum_{p=1}^{Lq} s_j^p t_{kq}^p, \quad (1)$$

где  $w_{j,kq}^{q1}$  – элемент матрицы весов связей, передающих сигналы с выходов  $A$ -нейронов на входы нейронов  $B^q$ -поля,  $q = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, n}$ ,  $kq = \overline{1, mq}$ ,  $mq$  – число нейронов в  $B^q$ -поле элементов;  $Lq$  – число пар ассоциативных изображений, запоминаемых в весах связей между  $A$ -нейронами и нейронами поля  $B^q$ ;  $(s_j^p, t_{kq}^p)$  – элементы  $p$ -й пары запоминаемых ассоциативных изображений  $(S^p = (s_1^p, s_2^p, \dots, s_n^p), t_q^p = (t_{1q}^p, t_{2q}^p, \dots, t_{mq}^p))$ ;  $S^p$  – входной вектор  $N$ -направленной ассоциативной памяти, подаваемый на входы нейронов  $A$ -слоя;  $t_q^p$  – вектор сигналов на выходах нейронов  $B^q$ -поля. Матрицы  $W_1^q$  весов связей, передающих из  $B^q$ -полей ( $q = \overline{1, N}$ ) имеют вид  $W_1^q = (W^q)^T$ , где символ  $T$  – символ транспонирования матрицы.

В режиме определения множества векторов, ассоциативных вектору, подаваемому на входы  $A$ -нейронов,  $N$ -направленная ассоциативная память функционирует по следующему алгоритму.

*Шаг 1.* Задается начальное значение переменной, с помощью которой определяется активное поле  $B^q$ -нейронов:  $q = 0$ , задается начальное время  $t = 0$  при работе с полем  $B^q$ -нейронов.

*Шаг 2.* Определяется текущее значение переменной  $q$ :  $q = q + 1$ .

Иницируются веса связей  $B^q$ -нейронов, рассчитанные с помощью соотношения (1) для множества пар ассоциативных изображений  $(S^p = (s_1^p, s_2^p, \dots, s_n^p), t_q^p = (t_{1q}^p, t_{2q}^p, \dots, t_{mq}^p))$ ,  $p = \overline{1, Lq}$ , обнуляются веса связей полей  $B^r$  ( $r = \overline{1, N}$ ,  $r \neq q$ ).

Иницируются нулевыми входными сигналами все входные  $A$ -нейроны и нейроны поля  $B^q$ :

$$U_{\text{вх.}Aj} = 0, U_{\text{вых.}Aj} = f_j(U_{\text{вх.}Aj}) = 0, j = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{вх.}B_{kq}^q} = 0, U_{\text{вых.}B_{kq}^q} = f_{kq}(U_{\text{вх.}B_{kq}^q}) = 0, kq = \overline{1, mq},$$

где  $U_{\text{вх.}Aj}$ ,  $U_{\text{вых.}Aj}$  – входной и выходной сигналы нейрона  $A_j$ ;  $f_j(U_{\text{вх.}Aj})$  – функция активации нейрона  $A_j$ .

*Шаг 3.* Для заданного входного изображения  $S^p = (s_1^p, s_2^p, \dots, s_n^p)$  выполняются шаги 4 – 9.

*Шаг 4.* Задаются входные сигналы нейронов  $A$ -слоя:

$$U_{\text{вх.}Aj} = S_j^p, j = \overline{1, n}.$$

Задается время  $t = t + 1$  и вычисляются выходные сигналы  $A$ -элементов

$$U_{\text{вых.}Aj}(t+1) = f_j(U_{\text{вх.}Aj}(t)), j = \overline{1, n}.$$

Выходные сигналы  $A$ -элементов посылаются на входы нейронов  $B^q$ -поля.

*Шаг 5.* До тех пор, пока не установятся выходные сигналы всех  $A$ - и  $B^q$ -нейронов, выполняются шаги 6 – 8 алгоритма.

*Шаг 6.* Адаптируется активность элементов  $B^q$ -поля.

Вычисляются входные и выходные сигналы  $B^q$ -элементов:

$$U_{\text{вх.}B_{kq}^q}(t+1) = \sum_{j=1}^n w_{j,kq}^{q1} U_{\text{вых.}Aj}(t+1), kq = \overline{1, mq}; \quad (2)$$

$$U_{\text{ВЫХ.}B_{kq}^q}(t+2) = f_{kq}(U_{\text{ВХ.}B_{kq}^q}(t+1)), \quad kq = \overline{1, mq}. \quad (3)$$

Выходные сигналы  $B^q$ -нейронов посылаются на входы элементов  $A$ -слоя.

*Шаг 7.* Адаптируется активность элементов  $A$ -слоя.

Вычисляются входные и выходные сигналы  $A$ -элементов:

$$U_{\text{ВХ.}A_j}(t+2) = \sum_{kq=1}^{mq} w_{kq,j}^{q2} U_{\text{ВЫХ.}B_{kq}^q}(t+2), \quad j = \overline{1, n}; \quad (4)$$

$$U_{\text{ВЫХ.}A_j}(t+3) = f_j(U_{\text{ВХ.}A_j}(t+2)), \quad j = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Выходные сигналы  $A$ -нейронов посылаются на входы элементов  $B^q$ -слоя.

*Шаг 8.* По соотношениям (2) и (3), но для моментов времени  $(t+3)$  и  $(t+4)$  вычисляются входные и выходные сигналы  $U_{\text{ВХ.}B_{kq}^q}(t+3)$ ,  $U_{\text{ВЫХ.}B_{kq}^q}(t+4)$ ,  $kq = \overline{1, mq}$  элементов  $B^q$ -слоя. Выходные сигналы нейронов  $B^q$ -слоя посылаются на входы  $A$ -элементов.

*Шаг 9.* Проверяется тест на сходимость. Сравниваются выходные сигналы  $A$ -нейронов  $U_{\text{ВХ.}A_j}(t+3)$  и  $U_{\text{ВХ.}A_j}(t+1)$ ,  $j = \overline{1, n}$ , а также нейронов  $B^q$ -слоя в моменты времени  $(t+4)$  и  $(t+2)$   $U_{\text{ВЫХ.}B_{kq}^q}(t+4)$ ,  $U_{\text{ВЫХ.}B_{kq}^q}(t+2)$ ,  $kq = \overline{1, mq}$ , полученные на текущей и предшествующих итерациях. Если не выполняется хотя бы одно из неравенств

$$U_{\text{ВЫХ.}A_j}(t+1) = U_{\text{ВЫХ.}A_j}(t+3), \quad j = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{ВЫХ.}B_{kq}^q}(t+2) = U_{\text{ВЫХ.}B_{kq}^q}(t+4), \quad kq = \overline{1, mq},$$

то вычисляются входные и выходные сигналы  $A$ -нейронов по соотношениям (4), (5), но для моментов времени  $(t+4)$  и  $(t+5)$ :  $U_{\text{ВХ.}A_j}(t+4)$ ,  $U_{\text{ВХ.}A_j}(t+5)$ . Затем выполняется присваивание  $t = t + 1$  и  $U_{\text{ВЫХ.}A_j}(t+1) = U_{\text{ВЫХ.}A_j}(t+5)$  и осуществляется переход на шаг 6 алгоритма, иначе – на выходах нейронов  $B^q$ -слоя фиксируются их выходные сигналы и осуществляется переход к шагу 10 алгоритма.

*Шаг 10.* Проверяется условие  $q = N$ , то есть на выходах всех ли  $B^q$ -полей элементов получены изображения, ассоциативные входному изображению  $S^p$ . Если условие не выполняется, то переход к шагу 2 алгоритма, иначе – к шагу 11.

*Шаг 11.* Останов.

Сеть может также функционировать в режиме подачи изображений на входы нейронов одного из  $B^q$ -полей ( $q = \overline{1, N}$ ). При этом на выходе нейронов  $A$ -слоя появляется изображение  $S^*$ , ассоциативное изображению, подаваемому на входы  $B^q$ -поля. Если это изображение подать на входы нейронов  $A$ -слоя, то на выходах  $N$  всех  $B^q$ -полей появится  $N$  векторов, ассоциативных вектору  $S^*$ .

Математическое моделирование нейронной сети с различными исходными данными подтвердило ее работоспособность.

**Выводы.** На основе двунаправленной ассоциативной памяти впервые разработана архитектура и алгоритмы функционирования многонаправленной ассоциативной памяти, которая способна запоминать и восстанавливать по входному изображению (вектору)  $N$  ассоциативных ему изображений. Направлением дальнейших исследований может быть разработка многонаправленной ассоциативной памяти, способной запоминать и воспроизводить из памяти цепочки ассоциативных изображений.

## Литература

1. Бондарев В.Н. Искусственный интеллект: Учебное пособие для вузов / В.Н. Бондарев, Ф.Г. Аде. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2002. – 615 с.
2. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Изд. дом "Вильямс", 2006. – 1104 с.
3. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.
4. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры и их применение на рубеже тысячелетий в Китае. В 2-х томах. Том. 1 / А.И. Галушкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 367 с.
5. Нейрокомпьютеры: Учебн. пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.
6. Wei Hui. A homogenous associative memory model based on structure learning and iterative self-

- mapping / Hui Wei // J. Softw. (China). – 2002. – Vol. 13. – No. 3. – P. 438 – 446.
7. Chen Song-can Complex morphological associative memories and their performance analysis / Song-can Chen, Wei-long Liu // J. Softw. (China). – 2002. – Vol. 13. – No. 3. – P. 453 – 459.
8. Бодянский Е.В. Искусственные нейронные сети: архитектура, обучение, применения / Е.В. Бодянский, О.Г. Руденко. – Харьков: ТЕЛТЕХ, 2004. – 372 с.
9. United States Patent 5,634,063 G06F 15/00; G06F 15/18 Neural network and method for operating the same / K. Ahn Seung, Wang Bo H., Ko B. Seok, K. Lee Yoon. – Related U.S. Application Data; Filed: Nov. 20, 1995; Appl. No.: 560,636; Date of Patent May 27, 1997.
10. Леонов С.Ю. Нейронная сеть для управления адресацией памяти / С.Ю. Леонов // Системи обробки інформації. – Вип. 7 (115). – Харків: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2015. – С. 97 – 101.
11. Патент на изобретение 108947 Украины МПК G06g 7/60, G06F 15/18. Пристрій багатозарової двонаправленої асоціативної пам'яті / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковортний, І.П. Хавіна, В.О. Бречко. – Замовник та власник патенту НТУ "ХПІ". – № а 2014 02402, заявлено 11.03.2014; опубл. 25.06.2015. – Бюл. № 12.

#### References

1. Bondarev V.N. Iskusstvennyj intellekt: Uchebnoe posobie dlja vuzov / V.N. Bondarev, F.G. Ade. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2002. – 615 s.
2. Hajkin S. Nejrnonnye seti: polnyj kurs / S. Hajkin. – M.: Izd. dom "Vil'jams", 2006. – 1104 s.
3. Kruglov V.V. Iskusstvennye nejrnonnye seti. Teorija i praktika / V.V. Kruglov, V.V. Borisov. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2001. – 382 s.
4. Galushkin A.I. Nejrrokomп'jutery i ih primenenie na rubezhe tysjacheletij v Kitae. V 2-h tomah. Tom. 1 / A.I. Galushkin. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2004. – 367 s.
5. Nejrrokomп'jutery: Uchebn. posobie dlja vuzov. – M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2002. – 320 s.
6. Wei Hui. A homogenous associative memory model based on structure learning and iterative self-mapping / Hui Wei // J. Softw. (China). – 2002. – Vol. 13. – No. 3. – P. 438 – 446.
7. Chen Song-can Complex morphological associative memories and their performance analysis / Song-can Chen, Wei-long Liu // J. Softw. (China). – 2002. – Vol. 13. – No. 3. – P. 453 – 459.
8. Bodjanskij E.V. Iskusstvennye nejrnonnye seti: arhitektura, obuchenie, primeneniya / E.V. Bodjanskij, O.G. Rudenko. – Har'kov: TELETEH, 2004. – 372 s.
9. United States Patent 5,634,063 G06F 15/00; G06F 15/18 Neural network and method for operating the same / K. Ahn Seung, Wang Bo H., Ko B. Seok, K. Lee Yoon. – Related U.S. Application Data; Filed: Nov. 20, 1995; Appl. No.: 560,636; Date of Patent May 27, 1997.
10. Leonov S.Ju. Nejrnonnaja set' dlja upravlenija adresaciej pamjati / S.Ju. Leonov // Sistemi obrobki informacii. – Vip. 7 (115). – Harkiv: HUPS im. I. Kozheduba, 2015. – S. 97 – 101.
11. Patent na izobretenie 108947 Ukrainy MPK G06g 7/60, G06F 15/18. Pristrij bagatosharovoї dvonapravlenoї asociativnoї pam'jati / V.D. Dmitrienko, O.Ju. Zakovorotnij, I.P. Havina, V.O. Brechko. – Zamovnik ta vlasnik patentu NTU "HPI". – № а 2014 02402, zajavleno 11.03.2014; opubl. 25.06.2015. – Bjul. № 12.

Рецензія/Peer review : 18.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 15.12.2015 р.

## ДЕРЕВОПОДІБНІ РОЗПІЗНАЮЧІ МОДЕЛІ, ЯК КОНЦЕПТУАЛЬНА ОСНОВА АНАЛІЗУ СУКУПНОСТІ ІНФОРМАЦІЇ

*У якості концептуальної основи аналізу сукупності інформації розглянуто деревоподібні розпізнаючі моделі. Розглядається презумпція про умовну незалежність спостережень щодо реалізації прихованого випадкового поля класів елементів. Визначається сутність апостеріорних розподілів та переходів між ними. Наводиться структура деревоподібного неорієнтованого графа, та алгоритм розпізнавання, сутність якого, полягає в заміні вихідного графа суміжності кожного з сукупності елементів системою дерев. Зазначено, що максимальне зменшення втрат при деревоподібній апроксимації досягається за рахунок збереження відповідних властивостей просторових зв'язків кожного елемента сукупності.*

*Ключові слова: апостеріорний розподіл, деревоподібний неорієнтований граф, розпізнаючі моделі, масив, Марковські властивості, розподіл ймовірностей, система дерев.*

YURA HEBURA

Uzhhorod National University, department of informative and operating systems and technologies, Uzhhorod, Ukraine

## TREELIKE RECOGNITION MODELS AS CONCEPTUAL FRAMEWORK OF TOTALITY INFORMATION ANALYSIS

*Abstract. As a conceptual framework of the analysis of aggregate data are considered recognizing tree model. We consider the presumption of conditional independence of the observations on the implementation of the hidden random field of classes of elements. It defines the essence of a posteriori distributions and transitions between them, and the posterior distribution is calculated by the upward view, starting with the terminal nodes. The structure of the tree of an undirected graph, and recognition algorithm, the essence of which is to replace the original graph adjacency each of the plurality of components of the trees as the arbitrary graph adjacency tree can not be replaced without loss of its basic properties carry complete information on the status of each element of the population. Each tree is the system used to obtain posterior probabilities only in cells of one column. It is indicated that the maximum reduction of losses in the tree approximation is achieved by storing the corresponding properties of the spatial relationships of each element of the population. The main defect of this algorithm is the need to build separate tree algorithm for creating graphs based on these strains.*

*Combining different approximating graphs makes it possible to avoid the development of special algorithms to build the tree graph adjacency elements aggregate information as well as significantly improve the results of an independent recognition of classes of elements connected to each other.*

*Key words: the posterior distribution, tree undirected graph, recognizing patterns, array, Markov properties, the probability distribution of the system tree.*

**Постановка проблеми.** Фундаментальною основою класичної теорії розпізнавання образів є припущення про незалежність елементів множини, що підлягає розпізнаванню. Обов'язковість щодо прийняття рішень про класи елементів взаємопов'язаного масиву призводить до необхідності відмови від принципу незалежності спостережень у рамках сукупності, що розпізнається.

На сьогодні, найбільш зручним способом представлення взаємозв'язків між елементами масиву даних є граф сусідства з ненаправленими ребрами без петель. Говорячи про лінійно впорядковані сукупності, граф сусідства є ланцюгом.

У дійсних задачах обробки масивів інформації безліч об'єктів представлених до розпізнавання, складають єдиний масив, що становить сутність дослідження із замкнутою структурою елементів. Тоді, як класична теорія вимагає розглядати сукупність, як окремі об'єкти, що мають свою структуру і не залежать від загального рішення.

Традиційні методи аналізу сукупності інформації виявляються недостатніми за для адекватного вирішення поставленого завдання тому, що структуризація та параметризація цих задач за допомогою класичної теорії графів є в принципі неповною, так як дана теорія не передбачає відображення внутрішніх взаємозв'язків, вдовольняючись тільки поняттями і позначеннями.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** В умовах сьогодення, високий рівень розвитку сучасної комп'ютерної техніки виходить на перше місце у будь-якій сфері наукового дослідження, проте, до теперішнього часу, залишається цілий ряд практичних завдань, вирішення яких виявляється досить проблематичним для більшості науковців. До числа подібних завдань відноситься задача розпізнавання образів. Це, у першу чергу, обумовлено складністю формалізації процесу сприйняття видимих образів. Виходячи з цього, все ще немає розробленого математичного або технологічного підходу який би задовольняв усі потреби цієї сфери, та ефективно здійснював процес розпізнавання. [3, 4, 5] Однак, варто зазначити, що для деяких ситуацій, математичні моделі є доволі придатними для тієї чи іншої практичної задачі, та при застосуванні математичного підходу вдається отримати задовільні результати.

Проблематика дослідження математичних моделей деревоподібних розпізнаючих систем представлена в роботах таких вітчизняних і зарубіжних вчених як С.Д. Двоєнко, А.В. Копилов, В.В. Мотль [1], С.З. Лі [2], К.М. Бішоп [3], В. Коломогоров [4], М.І. Джордан [5] та ін. Досить велика кількість публікацій присвячено опису алгоритмів різних прикладних систем [5]. Незважаючи на різноманітність

вирішуваних прикладних задач, в даний час склався загальноприйнятий підхід до подання задачі розпізнавання образів у масивах взаємопов'язаних об'єктів, у вигляді ієрархічного алгоритму, що представляє особливу композицію алгоритмів локалізації елементів розпізнавання, у вигляді графів [6].

В даний час ведеться активна робота з розвитку моделей і поширенню їх сфери дії на початково суперечливі і формалізаційні завдання. Значні результати у даному напрямку досягнуті В. Флешем, М.І. Шлезінгером [7].

У проблемі розширення математичних моделей деревоподібних систем, зокрема моделей розпізнаючих систем, з особливою гостротою постають питання щодо вибору того чи іншого продовження моделі. Пошук відповідей на дані питання передбачає проведення спільних досліджень будови в цілому сукупностей конкретних розпізнаючих алгоритмів. Такі дослідження стали можливі, завдяки введеному Д.В. Шангом [8] абстрактного поняття алгоритму розпізнаючих систем.

Також суттєвий внесок мала праця В.В. Мотиль [9] в якій розглядається окремий випадок таких алгоритмів розпізнавання в застосуванні до задачі навчання деревоподібних автоматів. У роботі Д. Гемана [10] досліджується вплив структурних властивостей розпізнаючих систем на ефективність навчання, а також на сприйнятливості до цілеспрямованого навчання середовища.

Проте, є можливість стверджувати про недосконалість розробок та необхідність структурування вчень та дослідження певних питань щодо математичних моделей деревоподібних систем розпізнавання елементів у сукупності.

**Мета статті.** Розглянути деревоподібні розпізнаючі моделі у якості концептуальної основи аналізу сукупності інформації. Дослідити презумпцію про умовну незалежність спостережень щодо реалізації прихованого випадкового поля класів елементів. Визначити сутність апостеріорних розподілів та переходів між ними. Навести структуру деревоподібного неорієнтованого графа та алгоритм розпізнавання.

**Викладення основного матеріалу.** Сукупність елементів  $T$ , що є комплементарними  $t \in T$  наводиться випадковим полем складеним з двох компонентів  $(X, Y)$ . Згадане поле має приховану компоненту  $X$ , яка задається параметрами  $(x_t, t \in T)$ . Дана компонента  $X$ , у своєму складі, має інформацію про класи  $x_t \in \mathcal{X} = \{1, \dots, m\}$  елементів масиву  $t$ . Та компоненту  $Y$ , яка є спостережуваною та задається параметрами  $(y_t, t \in T)$ .

Комплементарність сукупності елементів  $T$  експліцитно неорієнтованим графом  $F$  без петель, який є з'єднуючим звеном між суміжними елементами сукупності  $T$ .

Беручи за фундаментальну основу презумпцію про умовну незалежність спостережень щодо реалізації прихованого випадкового поля класів елементів

$$\psi_t(y_t | X) = \psi_t(y_t | x_t) \quad (1)$$

дає можливість, на етапі навчання, спиратися на роботу С.Д. Двоєнко, А.В. Копилова, В.В. Мотля, які детально наводять принципи розкриття класичної теорії [6].

Кон'єктура, щодо марковських властивостей прихованого поля  $X$  та деревоподібного неорієнтованого графа  $F$  дає можливість переключитися від приватних апостеріорних розподілів  $p_t(y_t | x_t)$  до апостеріорних розподілів типу  $p_t(x_t | Y), t \in T$  С.Д. Двоєнков, А.В. Копилов, В.В. Мотля наголошують, що попередньо випадкове поле  $X$  є одностороннім марковським

$$q_t(x_t | X_{(t)}) = q_t(y_t | x_r) \quad (2)$$

де  $t$  це нащадком вершини  $r$  щодо дерева  $F$ .

Апостеріорне випадкове поле  $X$  зберігається одностороннім марковським з тим же деревоподібним графом суміжності  $F$  та відповідними розподілами ймовірностей  $p_t(x_t | X_{(t)}, Y) = p_t(x_t | x_r, Y_t^+)$  кожна, з наведених ймовірностей, елемента  $t$  визначається відповідною частиною  $Y_t^+$ , щодо поля  $Y$ , та утворює під дерево з коренем  $Y_{(t)}$

Відповідно до закріпленого кореня  $t^*$  визначимо поле  $X$  як матрицю умовних ймовірностей переходів  $W(k, k)$  з незмінними умовними розподілами

$$\begin{aligned} q_t(x_t | x_r) &= q(x_t | x_r) \\ q_r(x_r | x_r) &= q(x_r | x_t) \\ x_t, x_r &\in \{1, \dots, m\} \end{aligned} \quad (3)$$

для переглядів, щодо кореня.

Задамося:

$$q(x_r | x_t), x_r = x_t \sim 1 \tag{4}$$

$$q(x_r | x_t), x_r \neq x_t \sim 0 \tag{5}$$

Отримана матриця  $W$  визначає марковський ланцюг з рівномірним фінальним розподілом ймовірностей  $p(x)$  значень прихованих змінних  $x_i$ . Зазначена матриця є однорідною – не розкладеною. Описані змінні визначаємо як апіорний приватний розподіл класів, щодо кореня  $q(xt^*)$

Наведений розподіл відмічається в усіх вершинах графу  $F$ .

Процедура розпізнавання сукупності інформації виконується згідно [8] та має у своєму складі два перегляди дерева  $F$  (рис. 1).

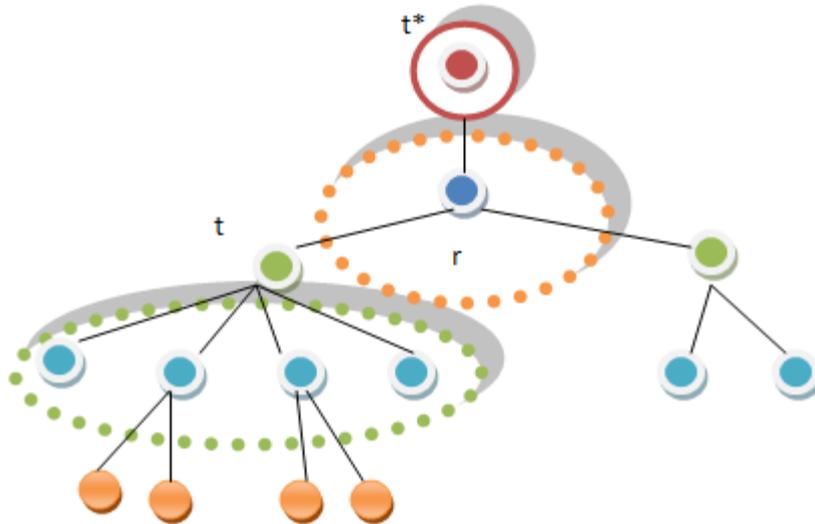


Рис. 1. Алгоритм розпізнавання  
\*розробка автора на основі джерел 6,8

Апостеріорний розподіл

$$p_t(x_t | Y_t^+) \propto p_t(x_t | Y_t^+) p^t(x_t | y_t), t \in T \quad p^t \tag{6}$$

обчислюється при висхідному перегляді, починаючи з термінальних вершин, де

$$p_t(x_t | Y_t^+) = p_t(x_t | y_t)$$

Апостеріорний розподіл

$$p_t(x_t | Y) \propto \sum_{x_r \in \mathcal{X}} p_t(x_t | x_r, Y) p_r(x_r | Y), t \in T^{+0}_{(r)}, r \in T \tag{7}$$

обчислюється при низхідному перегляді, де  $T^{+0}_{(r)}$  - безпосередні нащадки вершини  $r$ , і приймаються рішення про класи

$$i_t(Y) = \arg \max_{x_t \in \mathcal{X}} p_t(x_t | Y) \tag{8}$$

Спираючись на попередній досвід [3, 10, 11], слід наголосити, що безсумнівно довільний граф суміжності  $F$  не можна замінити деревом без втрати його основоположної властивості нести повну інформацію про становище кожного елемента сукупності  $T$ .

Сутність полягає в заміні вихідного графа суміжності кожного з сукупності елементів системою дерев. Кожне дерево з системи використовується для отримання апостеріорних ймовірностей  $p_t(x_t | Y)$  тільки в елементах одного стовпчика (рис. 2).

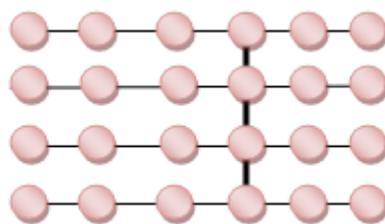


Рис. 2. Система дерев (правильна решітка)

У випадку коли йде деформація решітки (рис. 3) також використовується даний тип апроксимації.

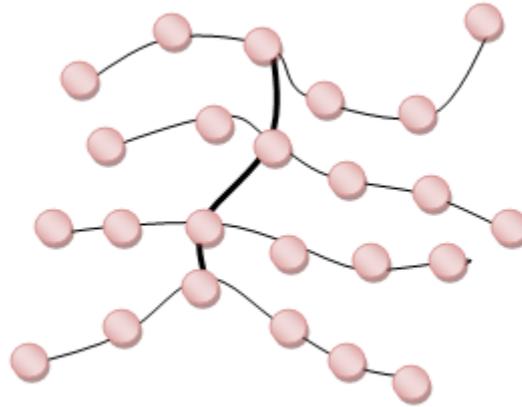


Рис. 3. Система дерев (деформація решітки)

Основним дефектом зазначеного алгоритму є необхідність у побудові окремих алгоритмів створення деревоподібних графів з урахуванням даних деформацій.

Максимальне зменшення втрат при деревоподібній апроксимації досягається за рахунок збереження відповідних властивостей просторових зв'язків кожного елементу сукупності.

У якості прикладу для зображення текстурно-растрового, визначимо безпосередньо набір ациклічних графів суміжності елементів (рис. 4).

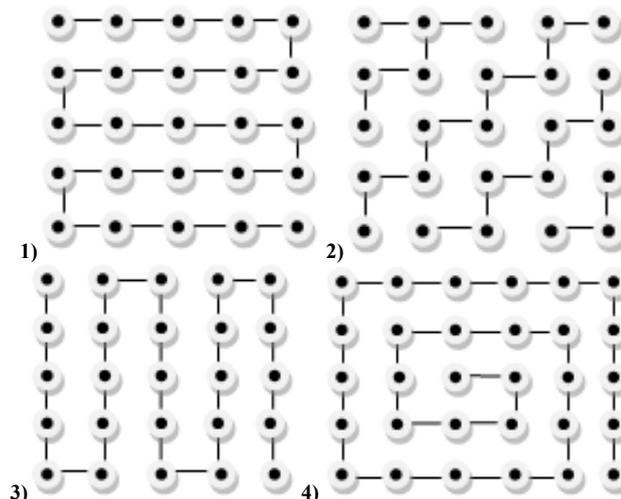


Рис. 4. Набір ациклічних графів суміжності елементів

Наведемо ациклічний граф суміжності елементів із запропонованого на рис. 4 набору та здійснимо один перехід від приватних розподілів до апостеріорних:

$$p_t(x_t|y_t) \rightarrow p_t(x_t|Y) \quad t \in T \quad (9)$$

що, у свою чергу, відповідають певним незалежним реалізаціям значень  $x_t, t \in T$ , прихованого поля  $X$  при спостереженні поля  $Y$ .

На наступному кроці, знову звернімося до процедури розпізнавання та застосуємо її, при цьому замість розподілу  $p_t(x_t|y_t)$  використаємо апостеріорний розподіл  $p_t(x_t|Y)$  отриманий на попередньому кроці. Наприкінці процедури перейдемо до нових спостережень, які також виступатимуть у ролі апостеріорних. Нові значення задамо як  $p_t(x_t|Y), t \in T$ . З проведеного дослідження випливає, що розподіл  $p_t(x_t|y_t)$  швидко приходить до стабільного стану. Також є можливість за рахунок проведення процедур обирати все нові і нові графи, тобто нова процедура = новий граф. Хоча це є доволі об'ємним механізмом. Так як, одноразове використання механізму розпізнавання для кожного деревоподібного графа суміжності з даного набору сформує свою безліч апостеріорних розподілів  $p_t(x_t|Y), t \in T$  та безпосередньо наведе відповідні рішення стосовно класів  $\xi_t(Y)$ . Виходячи з цього, та спираючись на працю Дж. Кітлєра [12] варто зазначити, що у реалізації прихованого поля  $X$  остаточне рішення щодо  $x_t, t \in T$  варто будувати

для кожної окремої вершини  $t \in T$  спираючись на суму апостеріорних розподілів  $p_t(x_t|Y)$ , які у свою чергу, мають бути отримані для кожного графа суміжності.

**Висновки.** Застосування апарату математичних методів, щодо вивчення деревоподібних розпізнаючих систем підтвердило його високу ефективність при розпізнаванні елементів складених у масиви, що є лінійно устаткованими.

Деревоподібні розпізнаючі моделі, використовуються у якості основи аналізу сукупності інформації, при цьому апроксимація графу суміжності певною мірою спотворює характер взаємозв'язків елементів сукупності об'єктів інформації, що складають масив. Спосіб комбінування різних апроксимуючих графів, який пропонується у межах наукового дослідження, дає можливість уникнути розробки спеціальних алгоритмів для побудови деревоподібних графів суміжності елементів сукупності інформації, а також дозволяє значно підвищити результати незалежного розпізнавання класів елементів, що пов'язані між собою.

### Література

1. Двоенко С.Д., Савенков Д.С., Шанг Д.В. Ациклические марковские модели в анализе массивов взаимосвязанных данных // Изв. ТулГУ. Естественные науки. 2010. – Вып.2. – С.173–185.
2. Li S.Z. Markov Random Field Modeling in Image Analysis. L: Springer–Verlag, 2009. – 371 p.
3. Bishop C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. N.Y.: Springer, 2006. – 738 p.
4. Kolmogorov V. Convergent Tree – Reweighted Message Passing for Energy Minimization // IEEE Trans. on PAMI. 2006. – V.10. – P.1568–1583.
5. Wainwright M.J., Jordan M.I. Graphical Models, Exponential Families, and Variational Inference // Foundations and Trends in Machine Learning. 2008. – V.1. – P.1–305.
6. Двоенко С.Д., Копылов А.В., Моттль В.В. Задача распознавания образов в массивах взаимосвязанных объектов. Алгоритм распознавания // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 12. – С. 162–176.
7. Schlesinger M.I., Flach B. Some Solvable Subclasses of Structural Recognition Problems // Proc. of Czech Pattern Recognition Workshop. 2000. – P.55–62.
8. Двоенко С.Д., Шанг Д.В. Алгоритмы подбора параметров древовидного марковского случайного поля в задаче распознавания растровых текстурных изображений // Информатика. – 2012. – №1. – С. 98–110.
9. Pattern Recognition in Spatial Data: A New Method of Seismic Explorations for Oil and Gas in Crystalline Basement Rocks / V.V. Mottl [etal.] // Proc. 15th ICPR'2000. Spain, Barcelona, 2000. – V.3. – P.210–213.
10. Geman S., Geman D. Stochastic Relaxation, Gibbs Distributions, and the Bayesian Restoration of Images // IEEE Trans. on PAMI. 1984. – V.6. – P.721–741.
11. Rabiner L.R. A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition // Proc. IEEE, 77. 1977. – V.2. – P.257–286.
12. Kittler J., Hatef F., Duin R.P. Combining classifiers // Proceedings of 13th ICPR. V.2. Track B. – Vienna (Austria). – 1996. – P. 897–901.

### References

1. Dvoenko S.D., Savenkov D.S., Shang D.V. Aciklicheskie markovskie modeli v analize massivov vzaimosvjazannyh dannyh, Izv. TulGU. Estestvennye nauki, 2010, vol.2, pp.173–185.
2. Li, S.Z. Markov Random Field Modeling in Image Analysis. L: Springer–Verlag, 2009, 371 p.
3. Bishop, C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. N.Y.: Springer, 2006, 738 p.
4. Kolmogorov V. Convergent Tree – Reweighted Message Passing for Energy Minimization // IEEE Trans. on PAMI. 2006. – V.10. – P.1568–1583.
5. Wainwright M.J., Jordan M.I. Graphical Models, Exponential Families, and Variational Inference, Foundations and Trends in Machine Learning. 2008, V.1, pp.1–305.
6. Dvoenko S. D., Kopylov A. V., Mottl' V. V. Zadacha raspoznavanija obrazov v masivah vzaimosvjazannyh ob#ektov. Algoritm raspoznavanija, *Avtomatika i telemehnika*, 2005, no.12, pp. 162–176.
7. Schlesinger M. I., Flach B. Some Solvable Subclasses of Structural Recognition Problems, Proc. Of Czech Pattern Recognition Workshop, 2000, pp. 55–62.
8. Dvoenko S. D., Shang D. V. Algoritmy pidbora parametrov drevovidnogo markovskogo sluchajnogo polja v zadache raspoznavanija rastrovih teksturnih izobrazhenij, *Informatika*, 2012, no.1, pp. 98–110.
9. Pattern Recognition in Spatial Data: A New Method of Seismic Explorations for Oil and Gas in Crystalline Basement Rocks / V.V. Mottl [etal.], Proc. 15th ICPR'2000. Spain, Barcelona, 2000, V.3, pp. 210–213.
10. Geman S., Geman D. Stochastic Relaxation, Gibbs Distributions, and the Bayesian Restoration of Images, *IEEE Trans. on PAMI*. 1984, V.6, pp.721–741.
11. Rabiner L.R. A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition, *Proc. IEEE*, 77. 1977, V.2., pp. 257–286.
12. Kittler J., Hatef F., Duin R.P. Combining classifiers, *Proceedings of 13th ICPR. V.2. Track B., Vienna (Austria)*, 1996, pp. 897–901.

Рецензія/Peer review : 5.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 13.12.2015 р.

## КОНТРОЛЬ ВИКОНАННЯ АРИФМЕТИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ НА ОСНОВІ МОДУЛЯРНИХ КОДІВ

*У статті запропоновано метод контролю правильності виконання арифметичних операцій на основі модулярних коректуючих кодів. Розроблено алгоритм виявлення та виправлення помилок при виконанні арифметичних операцій та структурну схему пристрою контролю арифметичних операцій в арифметико-логічному пристрої.*

*Ключові слова: арифметичні операції, модулярна арифметика, система залишкових класів, коректуючі коди.*

VASYL YATSKIV  
Ternopil National Economic University

### THE ARITHMETIC OPERATIONS CONTROL BASED ON MODULAR CODES

*The method for error checking of arithmetic operations based on modular correcting codes is proposed in the article. The error detection and correction algorithm for arithmetic operations is developed. The block diagram of arithmetic operations control device in arithmetic and logic unit is elaborated.*

*Keywords: arithmetic operations, modular arithmetic, residue number system, corrective codes, wireless sensor networks.*

#### ВСТУП

Забезпечення високої надійності роботи обчислювальних засобів, які функціонують в системах автоматизації різних галузей народного промисловості, є актуальною науковою проблемою [1]. Для контролю правильності виконання арифметичних операцій використовують властивості порівняння по модулю, на основі яких побудовані спеціальні арифметичні коди [2, 3]. Методи контролю арифметичних операцій розроблені і використовуються для арифметичних операцій, які виконуються в системі залишкових класів [4]. Але проблема підвищення надійності функціонування обчислювальних засобів, зокрема виявлення та виправлення помилок при виконанні арифметичних операцій, які функціонують в позиційних системах числення, залишається актуальною.

#### КОНТРОЛЬ ВИКОНАННЯ АРИФМЕТИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ

Розроблені в [5] модулярні коректуючі коди забезпечують ефективне виявлення та виправлення помилок при передачі даних в безпроводних сенсорних мережах. В даній роботі доведена можливість застосування даних кодів для виявлення та виправлення помилок при виконанні арифметичних операцій.

Нехай арифметичні операції виконуються над операндами  $A$ ,  $B$ , де  $A = (a_{k-1}, \dots, a_i, \dots, a_1, a_0)$ ,  $B = (b_{k-1}, \dots, b_i, \dots, b_1, b_0)$ ,  $a_i$ ,  $b_i$  – розряди чисел  $A$ ,  $B$  представлені в вісімковій або десятковій системах числення.

Суть методу виявлення та виправлення помилок при виконанні арифметичних операцій полягає в наступному для чисел  $A$ ,  $B$  над якими виконуються арифметичні операції обчислюються контрольні символи [5]:

$$a_k = |(v_{k-1} \cdot a_{k-1} + \dots + v_i \cdot a_i + \dots + v_0 \cdot a_0)|_P, \quad (1)$$

$$b_k = |(v_{k-1} \cdot b_{k-1} + \dots + v_i \cdot b_i + \dots + v_0 \cdot b_0)|_P, \quad (2)$$

де  $P$  – просте число,  $v_i$  – коефіцієнти взаємно прості з  $P$ .

Відповідно, арифметичні операції додавання, віднімання і множення виконуються над інформаційними розрядами чисел  $A$ ,  $B$  і над контрольними розрядами. З отриманого результату виконання арифметичних операцій над інформаційними символами обчислюється контрольний символ. Далі відбувається порівняння контрольних символів отриманого в результаті додавання контрольних символів чисел і контрольного символу, обчисленого від результату додавання інформаційних розрядів.

Операція додавання. Додавання інформаційних розрядів:

$$\begin{aligned} & (a_{k-1}, \dots, a_i, \dots, a_1, a_0) \\ & + (b_{k-1}, \dots, b_i, \dots, b_1, b_0) \\ & \hline & (c_{k-1}, \dots, c_i, \dots, c_1, c_0) \end{aligned}$$

де  $c_i$  – сума чисел  $a_i$ ,  $b_i$  без врахування переносів між розрядами.

Сума контрольних символів:

$$|a_k + b_k|_p = c_k.$$

Обчислюємо контрольний символ від результату додавання інформаційних розрядів:

$$c'_k = |(v_{k-1} \cdot c_{k-1} + \dots + v_i \cdot c_i + \dots + v_0 \cdot c_0)|_p.$$

Для виявлення помилки обчислюємо різницю між двома перевірочними символами:

$$s = |(c'_k - c_k)|_p,$$

якщо  $s = 0$  – помилки не має; при  $s \neq 0$  – наявна помилка.

Покажемо, що при відсутності помилок  $c'_k = c_k$ .

З наведених вище можна записати:

$$c'_k = |(v_{k-1} \cdot (a_{k-1} + b_{k-1}) + \dots + v_i \cdot (a_i + b_i) + \dots + v_0 \cdot (a_0 + b_0))|_p \quad (3)$$

$$c_k = |a_k + b_k|_p = |(v_{k-1} \cdot (a_{k-1} + b_{k-1}) + \dots + v_i \cdot (a_i + b_i) + \dots + v_0 \cdot (a_0 + b_0))|_p. \quad (4)$$

так як, праві частини виразів (3) і (4) однакові, то і ліві частини, за умови відсутності помилок, при виконанні арифметичних операцій будуть однаковими.

Розглянемо виявлення помилок при виконанні операції віднімання двох чисел. Віднімання інформаційних розрядів двох чисел  $A, B$ :

$$(a_{k-1}, \dots, a_i, \dots, a_1, a_0) - (b_{k-1}, \dots, b_i, \dots, b_1, b_0) = d_{k-1}, \dots, d_i, \dots, d_1, d_0,$$

де  $d_i$  – різниця чисел  $a_i, b_i$  по модулю  $P$ :  $d_i = |a_i - b_i|_p$ .

Значення контрольних символів обчислюються за формулами (1), (2).

Різниця контрольних символів:

$$|a_k - b_k|_p = d_k.$$

Значення контрольного символу від результату віднімання інформаційних розрядів дорівнює:

$$d'_k = |(v_{k-1} \cdot d_{k-1} + \dots + v_i \cdot d_i + \dots + v_0 \cdot d_0)|_p.$$

Для виявлення помилки обчислюємо різницю між двома перевірочними символами:

$$s = |(d'_k - d_k)|_p,$$

відповідно, якщо  $s = 0$  – помилки не має; в іншому випадку наявна помилка.

Аналогічно операції додавання можна показати, що при відсутності помилок значення контрольних символів будуть рівними, тобто  $d'_k = d_k$ .

Операція множення. Для виявлення помилок при виконанні операції множення чисел  $A, B$  обчислимо лінійну згортку розрядів двох чисел  $(a_{k-1}, \dots, a_i, \dots, a_1, a_0)$  і  $(b_{k-1}, \dots, b_i, \dots, b_1, b_0)$ .

Лінійна згортка обчислюється за формулою

$$m(n) = \sum_{i=0}^n a(i) \cdot b(n-i),$$

де  $n = 0 \dots (2 \cdot N - 2)$  при розрядності чисел  $N - 1$ .

При лінійній згортці розряди чисел зсувають один відносно іншого, попарно перемножуються і додаються (табл.1).

В результаті отримаємо послідовність  $(m_{2k-1}, \dots, m_i, \dots, m_1, m_0)$ , де  $m_i$  – розряди послідовності, які представляють добуток чисел  $A, B$  без врахування переносів між розрядами. Для отримання правильного результату множення необхідно провести корекцію переносів між розрядами.

Таблиця 1

**Згортка трьох розрядних чисел А, В.**

Розряди чисел А і В						Значення
		$a_0$	$a_1$	$a_2$		
$b_2$	$b_1$	$b_0$				$m_0 = a_0 \cdot b_0$
	$b_2$	$b_1$	$b_0$			$m_1 = a_1 \cdot b_0 + a_0 \cdot b_1$
		$b_2$	$b_1$	$b_0$		$m_3 = a_2 \cdot b_0 + a_1 \cdot b_1 + a_0 \cdot b_2$
			$b_2$	$b_1$	$b_0$	$m_4 = a_2 \cdot b_1 + a_1 \cdot b_2$
				$b_2$	$b_1$	$m_5 = a_2 \cdot b_2$

Контрольний символ операції множення обчислюємо, як добуток контрольних символів чисел  $A, B$  :

$$|a_k \cdot b_k|_p = m_k.$$

Контрольний символ від послідовності  $(m_{2k-1}, \dots, m_i, \dots, m_1, m_0)$ , отриманої в результаті згортки дорівнює:

$$m'_{2k} = |(z_{2k-1} \cdot c_{2k-1} + \dots + z_i \cdot c_i + \dots + z_0 \cdot c_0)|_p,$$

де  $z_i$  – значення отримані в результаті згортки взаємно простих коефіцієнтів  $v_i$ .

Для виявлення помилки обчислюємо різницю між двома перевірочними символами:

$$s = |(m'_{2k} - m_{2k})|_p,$$

якщо  $s = 0$  – помилки не має; при  $s \neq 0$  – наявна помилка.

### Алгоритм виявлення та виправлення помилок при виконанні арифметичних операцій

Загальний алгоритм виявлення помилок при виконанні арифметичних операцій складається з наступних кроків:

1. Обчислення контрольних символів операндів  $A, B$ ;
2. Виконання арифметичної операції (додавання, віднімання, множення) над операндами  $A, B$ .
3. Виконання арифметичної операції (додавання, віднімання, множення) над контрольними символами операндів  $A, B$ .
4. Обчислення контрольного символу від отриманого результату виконання заданої арифметичної операції.
5. Виявлення помилки (порівняння обчислених в пунктах 3 і 4 контрольних символів).
6. Виправлення помилок.

Виправлення помилки відбувається за алгоритмом виправлення помилок при передаванні даних з використанням модулярних коректуючих кодів.

Структурна схема виявлення помилок при виконанні арифметичних операцій приведена на рис. 1.

Схема виявлення та виправлення помилок при виконанні арифметичних операцій (рис.1) працює наступним чином. Операнди  $A, B$  поступають на АЛП, а також на ОКС\_А і ОКС\_В, де відбувається обчислення контрольного символу кожного операнду. Обчислені контрольні символи поступають на вхід блоку АПКС, де виконується задана арифметична операція над контрольними символами операндів. Результат виконання арифметичної операції R в АЛП поступає на блок ОКС\_Р, в якому обчислюється контрольний символ результату виконання арифметичної операції. В блоці обчислення синдрому обчислюється різниця між контрольним символом результату виконання арифметичної операції і значенням отриманим в результаті виконання арифметичної операції над контрольними символами операндів. Якщо результат обчислення синдрому дорівнює нулю, то на вихід мультиплексора (МХ) поступають дані з АЛП, якщо результат обчислення синдрому не дорівнює нулю, то на вихід мультиплексора (МХ) поступають дані з блоку виправлення помилок.

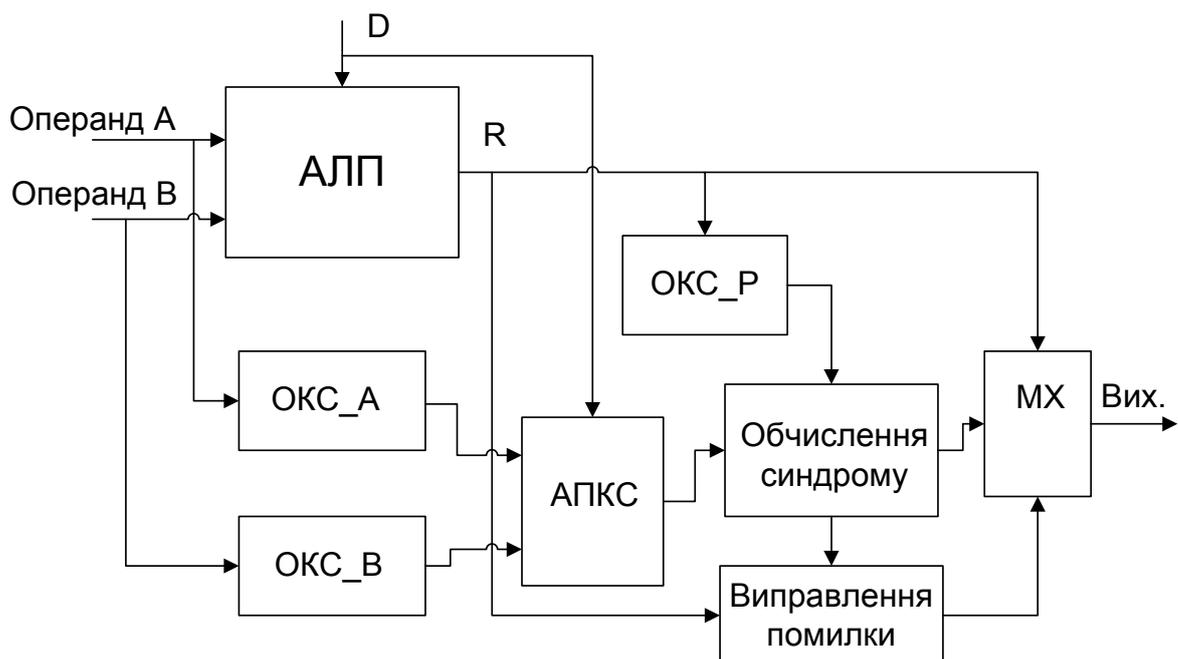


Рис.1. Структурна схема блоку виявлення помилок при виконанні арифметичних операцій

### Висновки

Запропонований метод виявлення та виправлення помилок при виконанні арифметичних операцій (додавання, віднімання, множення) на основі модулярних коректуючих кодів дозволяє виявляти помилки в двох десяткових розрядах та виправляти помилки в одному десятковому розряді при використанні одного контрольного символу.

### Література

1. Дрозд А. В. Оценка контролепригодности цифровых компонентов встроенных систем критического применения / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антошук, М. А. Дрозд, Ю. Ю. Сулима. Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2012. – №6. – С. 184-190.
2. Omondi A. Residue Number System: Theory and Implementation. / A. Omondi, B. Premkumar. Imperial College Press, vol. 2, 2007. – 296 p.
3. Акушский И.Я. Машинная арифметика в остаточных классах / И. Я. Акушский, Д.И. Юдицкий. – М.: Сов. радио. – 1968. – 460 с.
4. Система обработки информации и управления АСУ ТП на основе применения кодов в модулярной арифметике: моногр / В.И. Барсов, В.А. Краснобаев, И.А. Фурман, и др. – Х.: МОН, УИПА, 2009. – 159 с.
5. Hu Zhengbing. Increasing the Data Transmission Robustness in WSN Using the Modified Error Correction Codes on Residue Number System / Hu Zhengbing, V. Yatskiv, A. Sachenko // Elektronika ir Elektrotechnika. – 2015. – Vol 21, No 1 – P. 76-81.

### References

1. Drozd A.V. Evaluation testability digital components embedded systems of critical application / A. V. Drozd, V. S. Harchenko, S.G. Antoshchuk, M.A. Drozd, Yu. Yu. Sulima. Radio electronic and computer systems. – 2012. – №6. – P. 184-190.
2. Omondi A. Residue Number System: Theory and Implementation / A. Omondi, B. Premkumar. Imperial College Press, vol. 2, 2007. – 296 p.
3. Akushskiy I.Y. Machine Arithmetics in Residue Number System/ I.Y. Akushskiy, D.I. Yuditskiy, Moscow, Soviet Radio, 1968. – 460 p.
4. The information processing system and control automation systems based on the use of codes in modular arithmetic: monograph / V.I. Barsov, V.A. Krasnobaev, I.A. Furman, et al. - X.: MON UEPA, 2009. – 159 p.
5. Hu Zhengbing. Increasing the Data Transmission Robustness in WSN Using the Modified Error Correction Codes on Residue Number System / Hu Zhengbing, V. Yatskiv, A. Sachenko // Elektronika ir Elektrotechnika. – 2015. – Vol 21, No 1 – P. 76-81.

Рецензія/Peer review : 9.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 19.12.2015 р.

УДК 681.324

В.М. ДУБОВОЙ, О.Д. НИКИТЕНКО  
Вінницький національний технічний університет

## ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ

*В статті представлена доцільність використання методу декомпозиції завдань управління за допомогою кластеризації для побудови оптимальної структури розподілених систем управління з урахуванням вартості обміну інформацією. Для оцінювання міжзадачного інформаційного обміну застосовано метод інформаційних потоків. Результати можуть бути використані для підвищення ефективності управління складними розподіленими технологічними процесами.*

*Ключові слова: інформаційний потік, оптимізація структури, розподілена система управління, кластеризація завдань, інформаційний обмін.*

V.M. DUBOVOY, O.D. NIKITENKO  
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

## OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF INFORMATION FLOW IN DISTRIBUTED CONTROL SYSTEMS

*Abstract - The aim of this paper is to solve the problem of building structures distributed control systems based on clustering management tasks to the cost of information exchange.*

*To do this, optimization of structure of information flow by decomposition of control problems so that management costs were minimal. For the evaluation of information flow between the subsystems apply the method of information flow, based on static measure the amount of information of Shannon and the operator presenting the main models of information processes. Cost performance subprocess, depending on its complexity, assessed using algorithmic models.*

*Results can be used to improve the efficiency of managing complex distributed technological processes.*

*Keywords: information flow, optimization of the structure, distributed control system, clustering tasks, exchange of information.*

### Вступ

Зміни у функціонуванні промислових підприємств, пов'язані із зростанням їх розмірів і складності, викликають необхідність інформаційної координації елементів виробництва, вдосконалення структури

систем управління. Проблема побудови розподілених систем управління стає актуальною в умовах безперервної адаптації сучасних виробництв до зовнішніх змін. Серед найбільш значущих напрямків в області побудови структур управління слід відзначити теорію управління ієрархічними багаторівневими системами [1-6]. В основу теорії покладені класичні методи математичного програмування, теорії ігор, теорії управління динамічними системами.

Можна виділити ряд основних завдань функціонування та управління ієрархічними системами [4-6], зокрема: задачу декомпозиції системи, завдання координації системи, завдання обліку невизначеності параметрів і змінних в ієрархічних системах прийняття рішень.

Визначення оптимальної структури розподіленої системи управління є актуальним завданням при розробці складних систем управління технологічними процесами. Концепція розподіленого управління технологічним процесом визначає ієрархічну структуру системи управління. Можна виділити три основні рівні ієрархії: 1) рівень датчиків і виконавчих механізмів для збирання даних про хід технологічного процесу і передачі керуючих сигналів; 2) рівень технологічного обладнання, наприклад, контролерів, які здійснюють і збір і обробку інформації, одержуваної з датчиків; 3) рівень диспетчеризації для вирішення задач оперативного управління технологічним процесом. Основними характеристиками структури, які підлягають вибору, є число рівнів і число підсистем на кожному рівні.

В існуючих рішеннях завдання побудови ієрархічних структур систем не враховується вартість обміну інформацією, що істотно впливає на вибір структури системи управління, і тому метою даної статті є вирішення задачі побудови структур розподілених систем управління на основі кластеризації завдань управління з урахуванням вартості обміну інформацією.

### Постановка задачі

Нехай задача керування розподіленим технологічним процесом, який складається з декількох підпроцесів, вимагає ресурсів загальною вартістю  $r_i$  і об'ємом інформації  $I_{ij}$ , забезпечення якої вимагає затрат  $c_{ij}$ , де  $i$  - керований підпроцес,  $j$  - підпроцес, з яким необхідна координація управління [7].

Таким чином, затрати на керування підпроцесом

$$q_i = r_i + \sum_{j \neq i}^n c_{ij} . \quad (1)$$

Необхідно виконати оптимізацію структури інформаційних потоків шляхом декомпозиції задач управління таким чином, щоб витрати на керування були мінімальні.

### Розв'язок задачі

Вартість виконання підпроцесу  $r_i$  залежить від його складності. Складність підпроцесу можливо оцінити з допомогою алгоритмічної моделі [8]. З урахуванням цього вартість виконання підпроцесу визначається наступним чином

$$r_i = g_1(S_i) + g_2\left(\sum_{v \in A_i} I_{iv}\right) . \quad (2)$$

де  $S_i$  - складність підпроцесу;

$I_{iv}$  - кількість інформації, необхідної для координації двох підпроцесів;

$g([P_{11}, P_{12}], [P_{21}, P_{22}])$  - вартісна функція;

$P_{11}$  - множина послідовних операцій;

$P_{12}$  - множина паралельних операцій;

$P_{21}$  - множина апаратно реалізованих операцій;

$P_{22}$  - множина програмно реалізованих операцій.

Оптимізація системи здійснюється в умовах структурної невизначеності. Оскільки структура системи характеризується матрицею  $B(n, n)$  суміжності  $n$  її підсистем, то в умовах повної визначеності елементи матриці є бінарними, а в умовах невизначеності елементи матриці описуються функцією невизначеності  $\beta_{ij}(x)$ .

Для отримання вартісної функції охарактеризуємо вплив наявності зв'язку між підсистемами на результат функціонування системи двома векторами:  $D(m)$ , елемент якого  $d_{ij}(x)$  характеризує вплив наявності зв'язку між  $i$ -ю і  $j$ -ю підсистемами на результат функціонування системи ( $m$  - кількість зв'язків між підсистемами);  $T(m)$ , елемент якого  $t_{ij}(x)$  характеризує вплив наявності зв'язку між  $i$ -ю і  $j$ -ю підсистемами на час отримання результату функціонування системи. Розглянемо окремі випадки отримання вартісної функції.

1. Вартісна функція паралельно з'єднаних підсистем, які забезпечують адитивний результат роботи системи. Матриця суміжності такої системи містить один ненульовий стовпець.

$$g_{nap} = E_0 \sum_{i=1}^n g_{P_{12i}} + \left[ C_0 - \sum_{i,j} \int_0^1 d_{ij}(x) \beta_{ij}(x) dx \right] + c_t \max_i \left[ \int_0^1 t_{ij}(x) (1 - \beta_{ij}(x)) dx \right]. \quad (3)$$

2. Вартісна функція паралельно з'єднаних підсистем, які забезпечують адитивний результат роботи системи.

$$g_{nap} = E_0 \sum_{i=1}^n g_{P_{12i}} + \left[ C_0 - \prod_{i,j} \int_0^1 d_{ij}(x) \beta_{ij}(x) dx \right] + c_t \max_i \left[ \int_0^1 t_{ij}(x) (1 - \beta_{ij}(x)) dx \right]. \quad (4)$$

3. Вартісна функція послідовно з'єднаних підсистем

$$g_{nap} = E_0 \sum_{i=1}^n g_{P_{12i}} + \left[ C_0 - \prod_{i,j} \int_0^1 d_{ij}(x) \beta_{ij}(x) dx \right] + c_t \sum_i \left[ \int_0^1 t_{ij}(x) (1 - \beta_{ij}(x)) dx \right], \quad (5)$$

де  $G = \{g_{P_{12i}}\}$  - вектор вартості апаратних засобів  $i$ -ї підсистеми;

$E_0$  - коефіцієнт окупності витрат на апаратні засоби, який дорівнює частині вартості апаратних засобів, які припадають на одне виконане завдання системи;

$C_0$  - вартість результату роботи системи;

$c_t$  - вартість витрат часу.

Запишемо вартісний критерій (2) в лінеаризованому вигляді

$$r_i = k_1 S_i + k_2 \sum_{v \in A_i} I_{iv}, \quad (6)$$

де  $A_i$  - множина інформаційних зв'язків між задачами управління операціями  $i$ -го підпроцесу, яка задана у вигляді матриці суміжності;

$I_{iv}$  - інформаційний потік у  $v$ -му інформаційному зв'язку;

$k_1, k_2$  - коефіцієнти.

Якщо управління підпроцесом забезпечується локальною системою, то витрати на забезпечення отримання зовнішньої інформації значно вище витрат на забезпечення внутрішніх потоків. Відповідно, витрати на забезпечення необхідного об'єму інформації

$$\sum_{j \neq i}^n c_{ij} = f_3 \left( \sum_{j \neq i}^n I_{ij} \right), \quad j \in \{A_0 / A_i\}, \quad (7)$$

де  $A_0$  - множина інформаційних зв'язків між задачами управління всього процесу;

«/» - операція доповнення,

або в лінеаризованому вигляді

$$c_{ij} = k_3 I_{ij}, \quad (8)$$

$$n = \text{card}[A_0 / A_i], \quad (9)$$

$$k_3 > k_2. \quad (10)$$

Якісний характер впливу кількості задач, розв'язок яких здійснюється в межах однієї локальної системи управління, на вартість виконання підпроцесу при  $\forall c_{ij} = c_0$  показаний на рис. 1.

Для оцінювання інформаційних потоків між підсистемами застосуємо метод інформаційних потоків (МІП) [9], який базується на статичній мірі кількості інформації Шеннона і операторному представленні моделей основних інформаційних процесів.

Аксіоматична основа метода співпадає з аксіоматичною основою Шеннонської теорії інформації. Крім аксіом при розробці МІП виникає необхідність використання ряду спрощуючих припущень. До них відносяться:

1. Припущення про спрямованість передачі інформації. Воно дозволяє нехтувати зворотнім впливом приймача на джерело інформації.

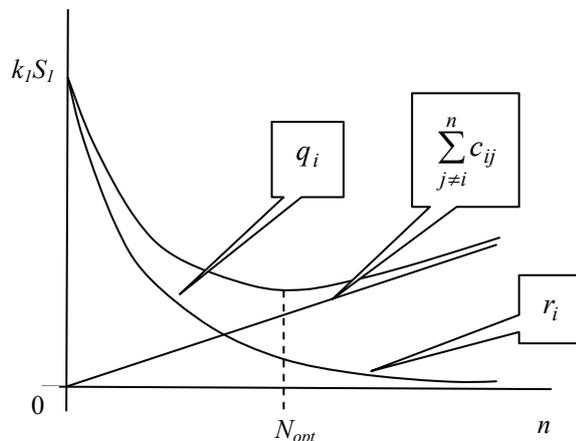


Рис. 1. Якісний характер впливу кількості задач, на вартість виконання підпроцесу

2. Припущення про відносність оцінки кількості інформації у статистичній мірі. Дозволяє виконувати оцінки інформаційних потенціалів у системі відліку зовнішнього спостерігача.

3. Припущення про збереження кількості статистичної інформації у замкнутій системі. Можливість використання принципу збереження кількості статистичної інформації аналогічного закону збереження енергії дає додаткові переваги статистичній інформаційній мірі, оскільки у структурній мірі кількість інформації зростає при виконанні операції копіювання всередині системи.

На основі аксіом та базових припущень будується система моделей інформаційних процесів. Така система має ієрархічну структуру. На нижньому рівні ієрархії знаходяться операторні моделі перетворення законів розподілу ймовірностей інформативних сигналів. Моделі передбачають використання операторних перетворень виду

$$f_Y(y) = \Phi(f_X(\bar{x}), C, G) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(\bar{x}) \phi(\bar{x}, y, C, G) d\bar{x} \quad (11)$$

Модель  $\phi^{(1)}(x, y)$  нелінійного статичного перетворювача  $Y = N(X)$  отримана з відомої теорії випадкових процесів формули нелінійного перетворення випадкового процесу представленням її через  $\delta$ -функцію Дірака

$$\phi^{(1)}(x, y) = \delta[y - N(x)] \quad (12)$$

Найскладніше питання оцінки законів розподілу ймовірностей – це оцінка розподілу комбінації двох випадкових процесів, а також розподілу результату проходження сигналу через інерційний перетворювач. Для цього необхідно визначити двомірний закон розподілу вхідних процесів. Оскільки задача отримання двомірного закону розподілу ймовірностей може бути віднесена до класу некоректних за Тихоновим, то всі методи її розв'язання є наближеними і відрізняються способами наближення і обмеженнями. В роботі [3] запропонований спосіб наближення. Він полягає у функціональному перетворенні безумовного розподілу в умовне. Вид функціонального перетворення визначається за допомогою рівняння регресії, яке пов'язує моменти безумовного і умовного розподілів. На основі такого наближення отримані вирази операторів перетворення:

- Двохвхідний перетворювач  $Y = N(X_1, X_2)$

$$f_Y(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x_1) f_X(x_2) \phi^{(2)}(x_1, x_2, y) dx_1 dx_2 \quad (13)$$

$$\phi^{(2)}(x_1, x_2, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta[y - N(x_1, \xi)] \delta \left[ \xi - r_{x_1 x_2} \sqrt{\frac{D_{x_2}}{D_{x_1}}} (x_1 - m_{x_1}) - \sqrt{1 - r_{x_1 x_2}^2} (x_2 - m_{x_2}) - m_2 \right] d\xi \quad (14)$$

де  $m_{x_1}$  – математичне очікування  $x_1$ ;

$m_{x_2}$  – математичне очікування  $x_2$ ;

$D_{x_1}$  – дисперсія  $x_1$ ;

$D_{x_2}$  – дисперсія  $x_2$ ;

$r_{x_1 x_2}$  – коефіцієнт кореляції  $x_1$  та  $x_2$ .

- Лінійний інерційний перетворювач  $y(t) = \int_0^t g(\tau) x(t - \tau) d\tau$

$$\phi^{(n)}(x, y, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \prod_{i=1}^{n-1} f_x(x_i - m_x) \delta \left[ y - (1-a)m_y - a \sum_{i=1}^{n-1} x_{n-i}(t - i\Delta\tau) g_0(i\Delta\tau) \right] dx_1 \dots dx_{n-1} \quad (15)$$

$$\text{де } a = \sqrt{\frac{D}{\Delta\tau D_x \sum_{i=1}^{n-1} g_0^2(i\Delta\tau)}}; \quad g_0(i\Delta\tau) = \frac{1}{\Delta\tau} \int_{i\Delta\tau}^{(i+1)\Delta\tau} g(\tau) d\tau; \quad \Delta\tau = \frac{G_{xx\max}}{D_x}; \quad n = \text{ent} \left[ \frac{T_{np}}{\Delta\tau} \right] + 1;$$

$$T_{np} = \frac{\pi W_{\max}}{\omega}; \quad \int_0^{\omega} W(\omega) d\omega$$

$G_{xx}$  – спектральна щільність сигналу  $X$ ;

$W(\omega)$  – частотна передаточна функція перетворювача;

$m_y$  і  $D_y$  – моменти розподілу вихідного сигналу.

З врахуванням виразів (12)...(15) загальна схема перетворення розподілів має вигляд

$$\begin{matrix} f_x(x) & \xrightarrow{A} & f_x(x_1, x_2, \tau) & \xrightarrow{B} & f_y(x) \\ R_x(\tau) & & & & R_y(\tau) \end{matrix} \quad (16)$$

де  $A$  і  $B$  – відповідні оператори.

Для отримання моделей складних послідовностей перетворень необхідно врахувати властивості ймовірнісних операторів:

**Властивість 1.** Операторна модель послідовності перетворень  $f_y = \Phi_2[\Phi_1 f_x]$  виражається добутком операторів  $\Phi = \Phi_2 \Phi_1$ .

**Властивість 2.** Операторна модель паралельних операторних перетворень  $f_y = \Phi^{(2)}[\Phi_1 f_x][\Phi_2 f_x]$  виражається добутком оператора другого порядку на добуток операторів гілок  $\Phi = \Phi^{(2)} \Phi_2 \Phi_1$ .

**Властивість 3.** Розподіл ймовірностей інформативного сигналу на виході замкнутого ланцюга перетворювачів є власна функція однорідного інтегрального рівняння Фредгольма другого роду з ядром  $\Phi_1 \Phi^{(2)} \Phi_2$ .

**Властивість 4.** Ймовірнісні оператори  $\Phi$  мають властивість асоціативності  $\Phi_1 \Phi_2 \Phi_3 = \Phi_1 (\Phi_2 \Phi_3)$ .

**Властивість 5.** Ймовірнісні оператори  $\Phi$  некомутативні  $\Phi_1 \Phi_2 \neq \Phi_2 \Phi_1$ .

**Властивість 6.** Існує одиничний ймовірнісний оператор, який задовольняє правилу множення  $\Phi \cdot 1 = \Phi$ .

Для отримання моделі основних інформаційних процесів зручно ввести узагальнені операторні інформаційні характеристики:

**Інформаційний потенціал** – гранична величина інформації про стан системи;

**Інформаційна провідність** – величина, що зворотна часу передачі або перетворення одиниці інформації.

$$Y_{12} = \Psi_N \Lambda \Psi \frac{F E_g^2 y_{12}}{P_n N} \quad (17)$$

де  $y_{12}$  узагальнена сигнальна провідність каналу;

$N$  – розрядність даних паралельної передачі;

$E_g$  – енергетичний поріг чутливості приймача;

$P_n$  – потужність завад;

$F$  – полоса частот каналу;

$\Psi$  – інформаційні оператори перетворення інформаційних потоків у каналі.

З використанням цих характеристик моделі інформаційних процесів мають вигляд:

1. Нелінійного статичного перетворення

$$I_y = \Psi_N i_x = I i_x, \quad (18)$$

або

$$i_y(t) = P \frac{r_x(\tau) r'_x(\tau) \left[ \left( \frac{K_E 2 \sigma_0 x}{K_{E1} D_x} \right)^2 - 1 \right]}{1 + r_x^2(\tau) \left[ \left( \frac{K_E 2 \sigma_0 x}{K_{E1} D_x} \right)^2 - 1 \right]} \approx P r_x(\tau) r'_x(\tau) \left[ \left( \frac{K_E 2 \sigma_0 x}{K_{E1} D_x} \right)^2 - 1 \right], \quad (19)$$

де  $P$  – ймовірність працездатності інформаційного каналу;

$D_x$  – діапазон зміни сигналу  $X$ ;

$\sigma_0$  – с.к.в. похибки початкового сигналу;

$\tau$  – проміжок часу між отриманням двох послідовних даних про значення контрольованого параметра;

$r_x(\tau)$  – кореляційна функція сигналу  $X$ ;

$K_E$  – ентропійні коефіцієнти.

2. Лінійного динамічного перетворення

$$i_y(t) = P \frac{r_x(\tau)r'_x(\tau) \left[ \left( \frac{K_{E2}\sigma_{0x}}{K_{E1}D_x} \right)^2 - 1 \right]}{1 + r_x^2(\tau) \left[ \left( \frac{K_{E2}\sigma_{0x}}{K_{E1}D_x} \right)^2 - 1 \right]} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} r_x(\tau_1)g(\tau_2)g'_\tau(\tau_1 - \tau_2)d\tau_1d\tau_2 \quad (20)$$

3. Виникнення інформаційних потоків у підсистемі сприйняття інформації від об'єктів контролю

$$J_0 = \ln(2\sqrt{(K_{E1}D_x)^2[1 - r_x^2(\tau)] + [K_{E2}\sigma_{0x}r_x(\tau)]^2}) \quad (21)$$

4. Виникнення інформаційних потоків у термінальному пристрої:

– в режимі з очікуванням

$$i = \frac{1}{T} \log(\text{card}[A]),$$

де  $A$  – алфавіт терміналу;  
 $T$  – середній час очікування.  
 – в режимі з перериванням

$$i = F_0 \log(\text{card}[A]) - \log(F_0\tau_n),$$

де  $F_0$  – середня частота коливань;  
 $\tau_n$  – похибка запізнення між перериванням і отриманням даних.

5. Виникнення інформаційних потоків у підсистемі накопичення та зберігання інформації. Якщо дані утворюють певну структуру, то

$$i = F_0 J = F_0 \left[ \sum_{j=1}^n \left( I_j - I_{S,j} \frac{I_S}{I_{S0}} \right) + I_S \right] \quad (22)$$

де  $n$  – число елементів у структурі;  
 $I_{S,j}$  – кількість інформації про статичну залежність  $j$ -го елемента структури;  
 $I_j$  – кількість інформації, що припадає на  $j$ -й елемент;  
 $n$  – довжина шляху у графі зв'язків елемента структури.

Для побудови таких моделей всі підсистеми розподілені на джерела інформації, споживачі інформації та перетворювачі інформації. Джерела та споживачі характеризуються інформаційним потенціалом, а перетворювачі – узагальненою інформаційною провідністю. Сукупність станів підсистеми представляється орієнтованим графом, а переходам з одного стану в інший відповідають інформаційні процеси другого рівня моделювання.

При децентралізованій координації у зв'язку з відсутністю координатора відсутні також і сигнали координації, які надходять від нього. Замість них на входи кожної локальної системи управління (ЛСУ) надходять сигнали від інших ЛСУ, в результаті чого інформаційний потік, який передається для здійснення координації, збільшується, що приводить до відповідного збільшення витрат. При використанні ієрархічної координації об'єднання завдань призводить не тільки до зміни вартості обміну даними, але і до зменшення інформаційних потоків по зовнішніх зв'язках, що пов'язано з агрегуванням інформації. Реалізація цього підходу передбачає вирішення завдання декомпозиції управління методом кластеризації підзадач з метою зменшення витрат на забезпечення інформацією.

Кластеризація завдань управління призводить до агрегування інформації, використовуваної для управління та координації [10]. Виграш від агрегування інформації в результаті кластеризації оцінимо з використанням лінеаризованих залежностей

$$\Delta c = [k_3 I_{10} + k_3 I_{20}] - [k_3 (I_1 \cup I_2) / I_{12} + k_2 I_{12}], \quad (6)$$

Завдання кластеризації вирішується на основі матриці відстаней між об'єктами кластеризації [11-13]. Такими об'єктами є підзадачі управління, а відстанями - витрати.

Для декомпозиції задач управління розподіленої технологічної системи пропонується модифікований алгоритм кластеризації за методом найближчого сусіда.

Задачу кластеризації будемо вирішувати шляхом мінімізації критерію

$$R = \sum_i r_i = \sum_i \left( k_1 S_i + k_2 \sum_{j \neq i}^n k_3 I_{ij} \right)$$

Основні кроки алгоритму кластеризації:

1. Початковий стан: кожна задача є окремим кластером, а всі зв'язки відмічені як зовнішні.
2. Цикл: поки серед всіх пар кластерів є такі, об'єднання яких зменшує критерій загальних витрат.

2.1. Цикл перебору всіх кластерів.

2.1.1. Цикл перебору усіх сусідніх кластерів стосовно розглянутого кластеру.

2.1.1.1. Розраховуються зміни витрат в результаті об'єднання кожної пари вершин.

2.1.1.2. Знаходиться варіант з найбільшою зміною витрат.

2.1.1.3. Якщо (зміна > 0), то

2.1.1.3.1. Здійснюється агрегування кластерів за правилами агрегування вершин графів.

2.1.1.3.2. Зменшується розмірність вектора вартості ресурсів і в нього замість вартостей ресурсів окремих кластерів, які об'єднувалися, записується вартість ресурсів об'єданого кластера.

2.1.1.3.3. Зв'язки між кластерами, які об'єднувалися, позначаються як внутрішні.

2.1.2. Кінець циклу.

2.2. Кінець циклу.

3. Кінець циклу.

4. Кінець.

Розглянемо приклад кластеризації множини з десяти завдань:  $T = \{t_1, \dots, t_i, \dots, t_{10}\}$ , і множини з трьох координаторів:  $P = \{p_1, p_2, p_3\}$ . Мета полягає в мінімізації загальних витрат на виконання і обміну інформацією. Позначимо  $k_1 S_{ij}$  витрати на виконання задач  $t_i$ , коли вона виконується координатором  $p_j$ , і  $k_3 I_{iv}$  витрати на обмін інформацією між завданнями  $i$  та  $v$ . Дані про витрати виражені в одиницях часу на виконання обробки та обміну інформацією. Вихідні дані задачі показані на рис. 2.

При застосуванні пропонованого алгоритму кластеризації до даних прикладу отримуємо наступний розподіл завдань

$$p_1 : T_2, T_3, T_5;$$

$$p_2 : T_4, T_7, T_8;$$

$$p_3 : T_1, T_6, T_9, T_{10}.$$

Порівняння максимального навантаження 180 одиниць, отриманого в роботі [13], з результатами, отриманими за допомогою запропонованого алгоритму кластеризації, показано в таблиці 1.

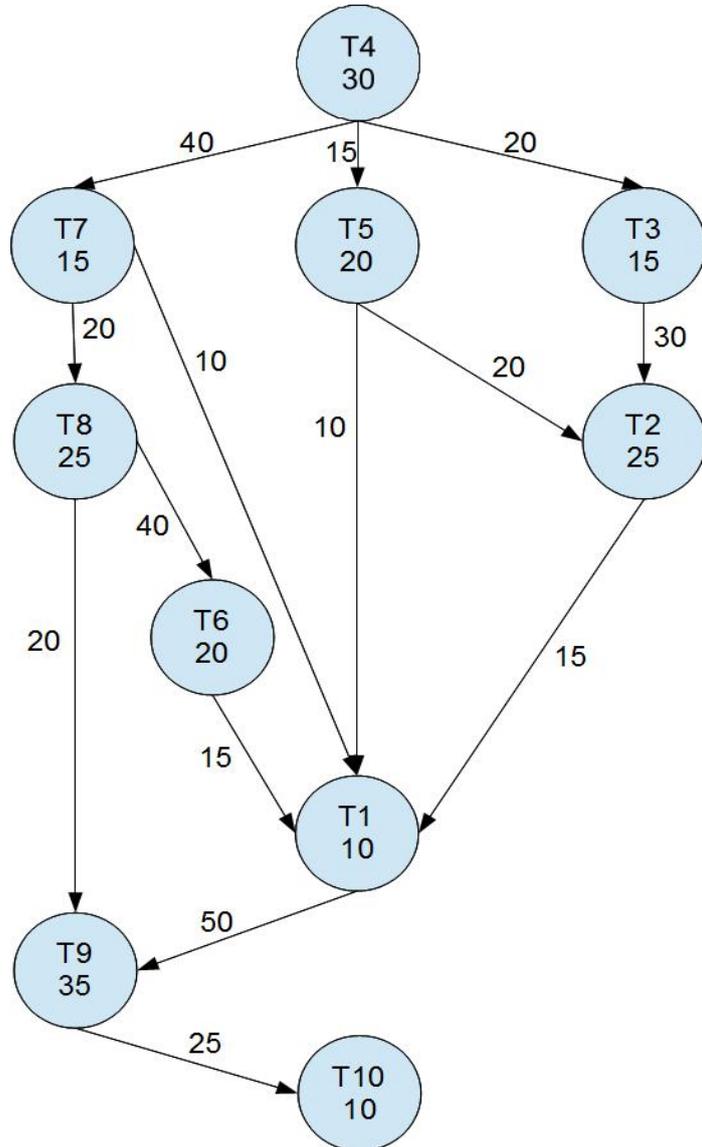


Рис.2. Спрямований ациклічний граф взаємозв'язку підзадач

Таблиця 1

Результати кластеризації підзадач

Координатор	Модифікований алгоритм кластеризації	
	задачі	навантаження
$p_1$	2,3,5	120
$p_2$	4,7,8	145
$p_3$	1,6,9,10	140
Максимум		145

Зауважимо, що наш алгоритм домігся кращого розподілу робочого навантаження.

## Висновки

У даній роботі пропонується метод декомпозиції завдань управління за допомогою кластеризації, що дозволяє звести до мінімуму міжкластерний обмін інформацією. Для оцінювання міжзадачного інформаційного обміну застосовано метод інформаційних потоків. Результати можуть бути використані для підвищення ефективності управління складними розподіленими технологічними процесами.

## Література

1. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / Месарович М., Мако Д. Такахара И.; – М.: Мир, 1973. – 344 с.
2. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем / В.Н. Бурков. – М.: Наука, 1977. – 255 с.
3. Волкович В.Л. Системный подход к исследованию иерархических систем управления / В.Л. Волкович; Н.Ф. Радомский. Материалы Международного симпозиума по проблемам организационного управления и иерархическим системам, Баку, 1971. – С. 25-31.
4. Попович А. Ю. Гибкая модель синтеза иерархических структур управления // Управление рисками и безопасностью. (Труды Института Системного Анализа РАН; Т. 41.) М.: ЛЕНАНД, 2009. С. 247-265.
5. Sethi S.P. et al. Optimal and hierarchical controls in dynamic stochastic manufacturing systems: A survey / S.P. Sethi, H. Yan, H. Zhang, Q. Zhang // Manufacturing & Service Operations Management. – 2002. – № 2. (4). – pp. 133–170.
6. Parmer G. West R. HIRES: A system for predictable hierarchical resource management / G. Parmer, R. West // Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS), 2011, 17th IEEE. – 2011. – pp. 180–190.
7. Ладанюк А. П., Системна задача координації в технологічних комплексах неперервного типу / А. П. Ладанюк, Д. А. Шумигай, Р. О. Бойко. – Режим доступу : [http://dSPACE.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/4444/1/Sh\\_3.pdf](http://dSPACE.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/4444/1/Sh_3.pdf).
8. Дубовой В. М., Никитенко О. Д. Оптимізація підсистем збору даних АСУТП в умовах комбінованої невизначеності / В. М. Дубовой, О. Д. Никитенко: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2011. – 169 с.
9. Дубовой В. М. Інформаційні потоки в моделюванні інформаційних систем. Друк. В кн.: "Контроль і управління в технічних системах", Т.2 – Вінниця: "УНІВЕРСУМ-Вінниця", 1997. - С.63-69.
10. Bayas M. M. Development of a coordination method for effective Decision-making in a hierarchical multilevel industrial system. / Bayas M. M. / «Радиоэлектроника, информатика, управление», 2014, № 2.
11. COMPACT — Comparative Package for Clustering Assessment. A free Matlab package, 2006.
12. Berkhin P. Survey of Clustering Data Mining Techniques / Berkhin P. : Accrue Software, 2002.
13. Murty J. Data Clustering: A Review / Jain Murty and Flynn: ACM Comp. Surv. – 1999.

## References

1. Mesarovich M. Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnykh sistem / Mesarovich M., Mako D. Takahara I.; – М.: Mir, 1973. – 344 p.
2. Burkov V.N. Osnovy matematicheskoy teorii aktivnykh sistem / V.N. Burkov. – М.: Nauka, 1977. – 255 p.
3. Volkovich V.L. Sistemnyj podhod k issledovaniyu ierarhicheskikh sistem upravleniya / V.L. Volkovich; N.F. Radomskij. Materialy Mezhdunarodnogo simpoziuma po problemam organizacionnogo upravleniya i ierarhicheskim sistemam, Baku, 1971. – pp. 25-31.
4. Popovich A. YU. Gибkaya model' sinteza ierarhicheskikh struktur upravleniya //Upravlenie riskami i bezopasnost'yu. (Trudy Instituta Sistemnogo Analiza RAN; T. 41.) М.: LENAND, 2009. pp. 247-265.
5. Sethi S.P. et al. Optimal and hierarchical controls in dynamic stochastic manufacturing systems: A survey / S.P. Sethi, H. Yan, H. Zhang, Q. Zhang // Manufacturing & Service Operations Management. – 2002. – № 2. (4). – pp. 133–170.
6. Parmer G. West R. HIRES: A system for predictable hierarchical resource management / G. Parmer, R. West // Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS), 2011 17th IEEE. – 2011. – pp. 180–190.
7. Ladanyuk A. P., Sistemna zadacha koordinacii v tekhnologichnih kompleksah neperernvogo tipu / A. P. Ladanyuk, D. A. SHumigaj, R. O. Bojko. – Rezhim dostupu : [http://dSPACE.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/4444/1/Sh\\_3.pdf](http://dSPACE.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/4444/1/Sh_3.pdf).
8. Dubovoj V. M., Nikitenko O. D. Optimizaciya pidsistem zboru danih ASUTP v umovah kombinovanoj nevznachenosti / V. M. Dubovoj, O. D. Nikitenko: Monografiya. – Viniicya: UNIVERSUM-Vinnicya, 2011. – 169 p.
9. Dubovoj V. M. Informacijni potoki v modelyuvanni informacijnih sistem. Druk. V kn.: "Kontrol' i upravlinnya v tekhnichnih sistemah", T.2 – Vinni-cya: "UNIVERSUM-Vinnicya", 1997. - pp.63-69
10. Bayas M. M. Development of a coordination method for effective Decision-making in a hierarchical multilevel industrial system. / Bayas M. M. / «Radioelektronika, informatika, upravlinnya», 2014, № 2.
11. COMPACT — Comparative Package for Clustering Assessment. A free Matlab package, 2006.
12. Berkhin P. Survey of Clustering Data Mining Techniques / Berkhin P. : Accrue Software, 2002.
13. Murty J. Data Clustering: A Review / Jain Murty and Flynn: ACM Comp. Surv. – 1999.

Рецензія/Peer review : 22.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 19.12.2015 р.

УДК 681.586:57.089

С.М. ЗЛЕПКО, С.В. КОСТИШИН, Р.М. ВИРОЗУБ

Вінницький національний технічний університет

Н.В. ТИТОВА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет»

## **КЛАСИФІКАЦІЯ ПЕРВИННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ БІОМЕДИЧНИХ СИГНАЛІВ**

*В статті розглянуто класифікацію первинних вимірювачів біомедичних сигналів, давачів і сенсорів, класифікованих за різними критеріями функціональності; особливостями застосування і способами забезпечення контакту; рівнем поляризації і кратністю застосування. Наведено узагальнену структурну схему біомедичного перетворювача, на основі якої побудовані схеми сенсорів: простих з обробкою інформації; активних; інтелектуальних. Розглянуто послідовність перетворення схеми простого сенсора у схему сенсорно-комп'ютерних систем. Підтверджено, що саме запропонована класифікація забезпечує адекватний вибір давачів і сенсорів при проектуванні медичних приладів і систем.*

*Ключові слова:* класифікація, критерій, сенсор, давач, перетворювач, біомедичний сигнал

S.M. ZLEPKO, S.V. KOSTISHYN, R.M. VYROZUB

1- Vinnytsia national technical university

N.V. TITOVA

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

## **CLASSIFICATION OF PRIMARY MEASURING BIOMEDICAL SIGNALS**

*Abstract – In the article the classification of primary meters biomedical signals, sensors and transducers classified according to different criteria functionality; specific applications and ways of providing contact; the level of polarization and frequency of use. Summarizes the biomedical transducer block diagram on which circuit sensors built: from simple information processing; active; intelligent. Considered sequence conversion circuit in the sensor circuit simple sensory-computer systems. Confirmed that it proposed classification provides adequate choice deliverer and sensors in the design of medical devices and systems.*

*Keywords:* classification criteria, sensor, sensor, transducer, biomedical signal

### **Вступ**

Вимірювальне перетворення біомедичних сигналів представляє собою процес перетворення однієї фізичної величини біомедичного сигналу в іншу фізичну або електричну величину, функціонально з нею пов'язану, яка не містить інформаційних втрат біосигналу і представлена у вигляді, що є найбільш зручним для подальшої обробки.

Питання, що пов'язані із класифікацією перетворювачів біомедичних сигналів завжди займали чільне місце, якому приділялося максимум уваги. Сучасний, суттєвий інтерес до вимірювальних перетворювачів біосигналів зумовлений аналогічними проблемами, що характерні для всієї галузі біомедичного приладобудування: неоднозначність термінології: поява нових класів перетворювачів з нечітко визначеними функціями та умовами використання тощо. А враховуючи, що перетворювачі біомедичних сигналів є першою, найбільш відповідальною часткою будь-якої вимірювальної, діагностичної, інформаційної або іншої за призначенням системи, і одночасно – джерелом максимальної похибки, питання їх застосування і схмотехнічної реалізації набувають додаткової актуальності.

### **Основний текст статті**

Згідно [1] електрод (електрод) – це пристрій, що використовується при реєстрації біоелектричних потенціалів, має струмознімальну поверхню, яка контактує з біологічним об'єктом і вихідні елементи. За визначенням, наведеним в [2, 3] – давач – це пристрій, що перетворює величину, яка контролюється або вимірюється, в сигнал, зручний для подальшої передачі, перетворення або реєстрації. Аналогічно, вимірювальний перетворювач представляє собою вимірювальний засіб, призначений для отримання сигналу, що вимірюється у формі, зручній для передачі і подальшої обробки, але не придатний для безпосереднього сприйняття лікарем [2, 3].

Щодо визначення поняття „сенсор”, наведемо два найбільш поширених в теорії і практиці первинних перетворювачів формулювання. Сенсор [2, 3] – вимірювальний пристрій у вигляді конструктивної сукупності одного або декількох вимірювальних перетворювачів величини, що вимірюється і контролюється у вихідний сигнал для дистанційної передачі та використання в системах керування і має нормовані метрологічні характеристики.

Згідно [4], сенсор – це пристрій, що перетворює фізичні (фізико-хімічні) зміни в об'єкті дослідження, його фізичний вплив в інформаційний сигнал для користувача. Сенсор – це ланка, що зв'язує реальний „фізичний” світ і світ інформаційних моделей.

Інтелектуальний сенсор – це сенсор, який має в своєму складі комп'ютер і завдяки цьому здатний виконати досить складну обробку первинної інформації: враховувати всі нелінійності і необхідні поправки; видавати дані в найбільш зручній формі; впливати на об'єкт спостереження, сприймаючи і аналізуючи ці зміни; проводити самоконтроль і самодіагностику; накопичувати і систематизувати дані; адаптуватися до зовнішніх умов та ін. [4].

Узагальнена структура схеми такого перетворювача показана на рис. 1 [5]:

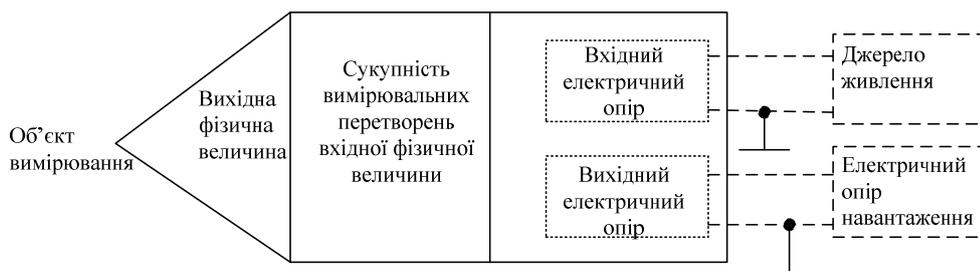


Рис. 1 Узагальнена структура схеми біомедичного перетворювача

Біоелектричні електроди, відповідно до [4, 5] класифікують за такими критеріями:

1. За особливостями застосування: а) для короткочасного застосування; б) для довготривалого застосування; в) для моніторного контролю; г) для динамічного нагляду; д) екстреного застосування.

2. За функціональними критеріями: а) електрокардіографічні; б) електроміографічні; в) електроенцефалографічні; г) електоркортикографічні; д) базальні; г) електроокулографічні; ж) електрогастрографічні; з) електорретинографічні.

3. За способом забезпечення контакту з об'єктом: а) підшкірні (голкові); б) порожнинні; в) внутрішньотканинні; г) мікроелектроди; д) поверхневі (нашкірні) – металічні, емнісні, резистивні, емнісно-резистивні;

4. За рівнем поляризації: а) такі, що поляризуються; б) такі, що слабо поляризуються; в) такі, що не поляризуються.

5. За кратністю застосування: а) одноразові; б) багаторазові; в) незаповнений електрод одноразовий; г) заповнений електрод одноразовий.

6. За способом забезпечення контакту зі шкірою біооб'єкта: а) такі, що присмоктуються; б) такі, що клеяться; в) такі, що підкладаються; г) такі, що притискаються.

До критеріїв, за якими найчастіше класифікують вимірювальні засоби біометричних сигналів належать такі: за призначенням; за принципом дії; за формою вихідного сигналу тощо.

Якщо класифікувати давачі за принципом дії, то можемо визначити дві основні групи [2, 6] біокеровані та енергетичні. Перші, в свою чергу, поділяються на активні (генераторні) і пасивні (параметричні). В активних датчиках параметр, що вимірюється, безпосередньо не перетворюється в електричний сигнал, придатний для подальшої обробки і представлення. До таких датчиків можна віднести п'єзоелектричні, індукційні перетворювачі, термоелементи [2]. Особливістю параметричних датчиків є наявність у їх складі електродів, які безпосередньо вмикаються в вимірювальний ланцюг підсилювачів, з виходу яких знімається біосигнал, придатний до подальшої обробки [2] (рис.1).

Енергетичні датчики, на відміну від біокерованих, впливають на органи і тканини, створюючи в них т.з. немодульований енергетичний потік з вираженими і постійними у часі характеристиками.

В залежності від місця у вимірювальному каналі, перетворювачі розділяються на первинні і вторинні. До перших однозначно віднесені давачі, до вторинних – підсилювачі нормовані, АЦП, ЦАП, підсилювачі масштабуючі тощо.

Клас сенсорів передбачає розподіл на: прості сенсори; прості сенсори з обробкою інформації; активні сенсори; пасивні сенсорно-комп'ютерні системи; активні сенсорно-комп'ютерні системи; інтелектуальні сенсори (рис. 2-6).

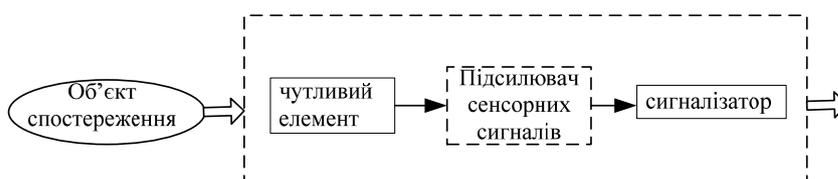


Рис. 2 Функціональна схема простого сенсора

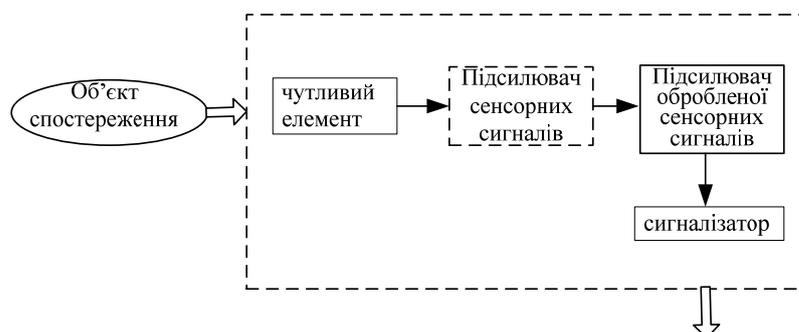


Рис. 3 Структура простого сенсора з обробкою інформації

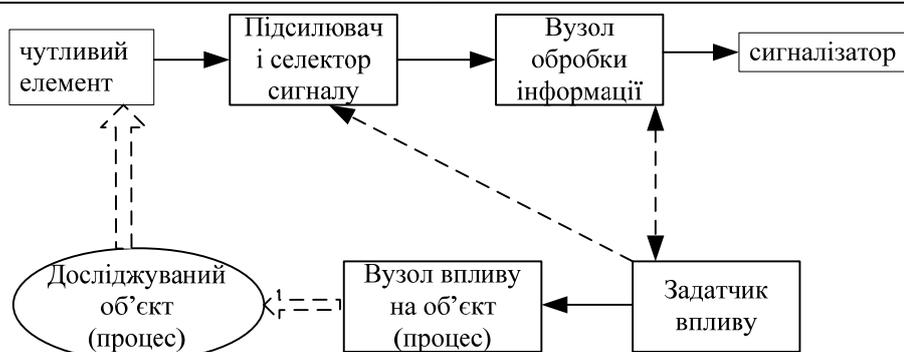


Рис.4 Функціональна схема активного сенсора

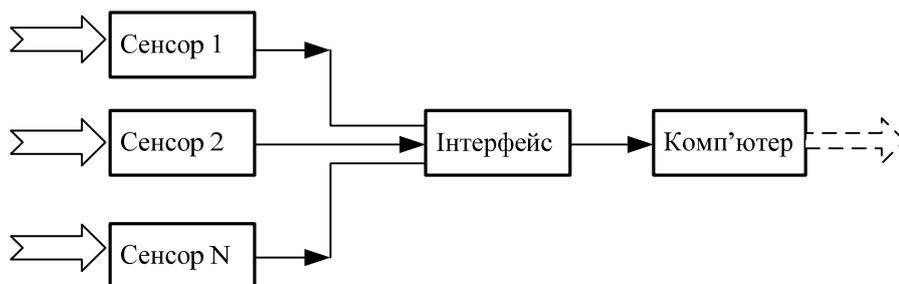


Рис.5 Структура пасивної сенсорно-комп'ютерної системи (пасивний сенсор)

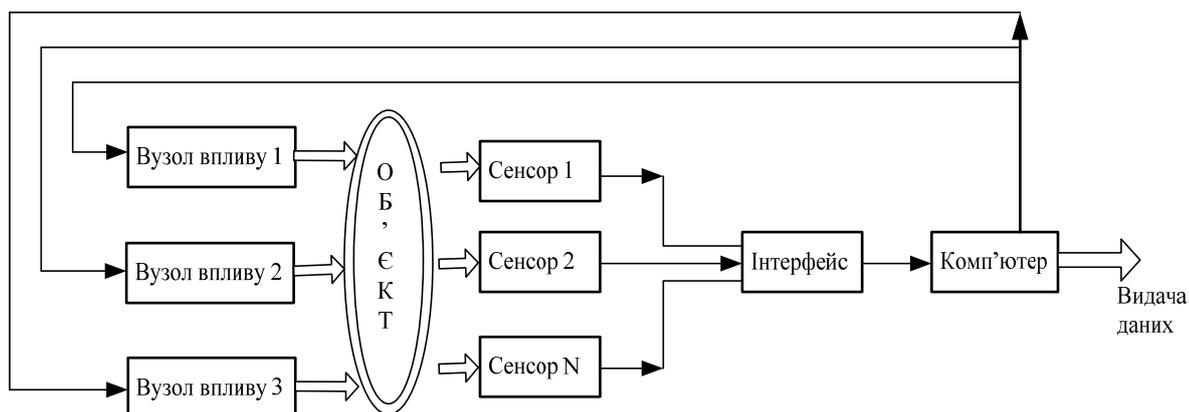


Рис. 6 Структура активної сенсорно-комп'ютерної системи (активний сенсор)

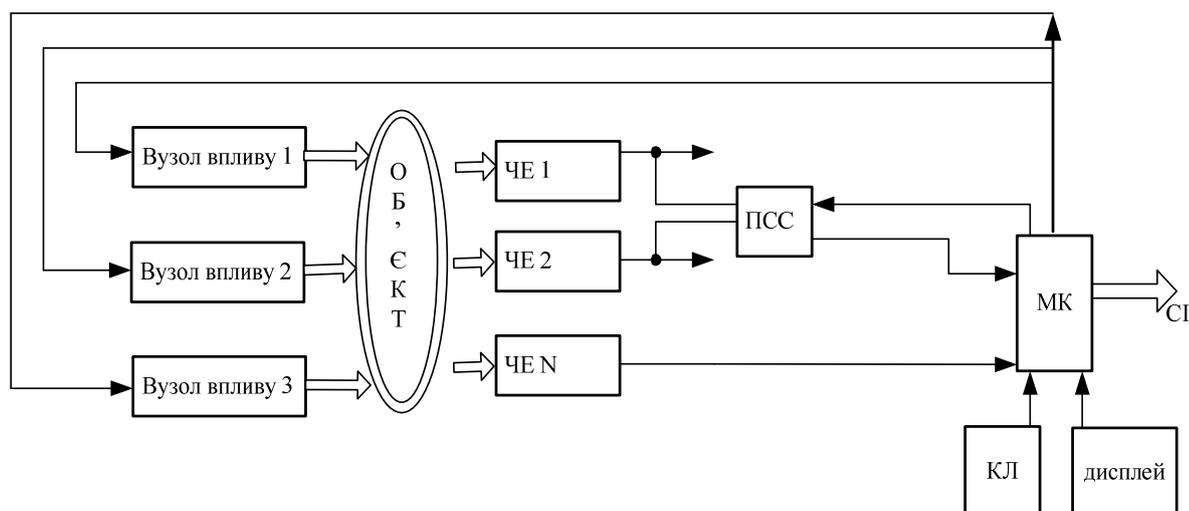


Рис. 7 Функціональна схема «інтелектуального» сенсора

ЧЕ – чутливий елемент; ПСС – підсилювач селектор сигналів; МК – мікрокомп'ютер; КЛ- - клавіатура; СІ – стандартний інтерфейс.

Тоді з урахуванням вищевикладеного, класифікацію первинних вимірювальних засобів біомедичних

сигналів для сімейної медицини можна представити таким чином (рис. 7).

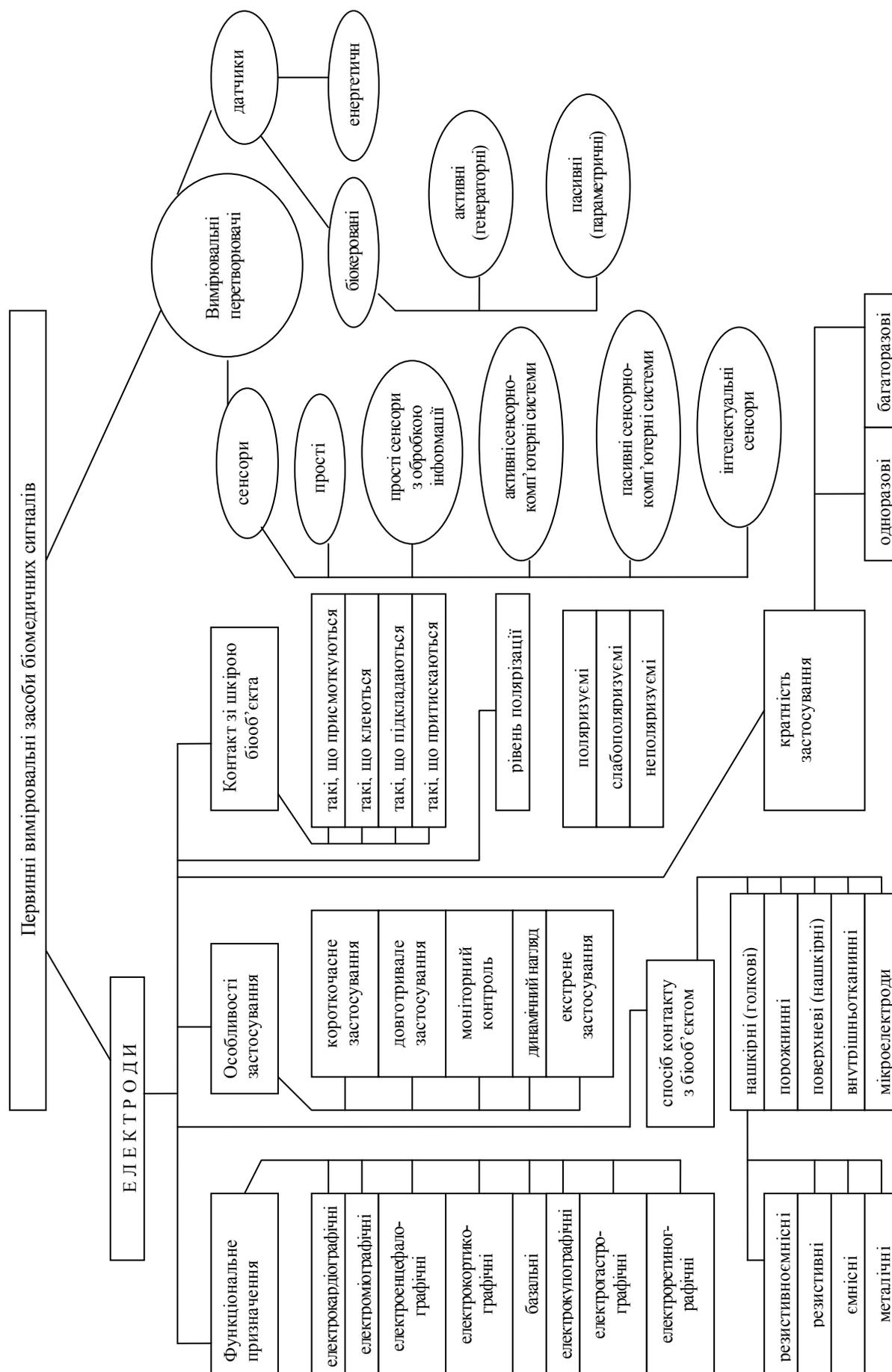


Рис. 7 Класифікація первинних вимірювальних засобів біомедичних сигналів

Як правило, вихідною величиною перетворювача є величина діагностичного показника, що характеризує біосигнал. Вона визначається за допомогою функції перетворення вимірювального перетворювача, що може бути описана аналогічним виразом або графіком. Для опису функції перетворення, яке має лінійну залежність, достатньо двох параметрів: початкового значення вихідної величини (нульовий рівень), що відповідає нульовому або іншому характерному значенню вхідної величини, і значення показника відносного нахилу характеристики-чутливості перетворювача [2]. До інших характеристик перетворювачів відносяться: роздільна здатність, динамічний діапазон, параметри динамічного режиму; постійна часу датчиків, час реакції [2].

### Висновки

Таким чином, представлена класифікація забезпечує ефективний вибір давачів або сенсорів для реєстрації і вимірювання біомедичних сигналів, які представляють собою вимірювальні засоби, призначені для отримання сигналу, що вимірюється і які використовуються для подальшої обробки і представлення.

### Література

1. ДСТУ 22-21-23. Електроди для зняття біоелектричних потенціалів. Терміни і визначення.
2. Федотов А. А. Математическое моделирование и анализ погрешностей измерительных преобразователей биомедицинских сигналов / А. А. Федотов, С. А. Акулов. – М. : Физматлит, 2013. – 282 с.
3. Монастирський З.Я. Особливості вживання української метрологічної термінології в науково-технічній літературі та документації / З. Я. Монастирський // Гідроенергетика України. – 2010. – №4. – С.55-56.
4. Национальный открытый институт ИНТУИТ. Лекция 1: от простых сенсоров – к интеллектуальным. Режим доступа: <http://www.intuit.ru/studies/courses/590/446/lecture/9914?page=4>. – Дата обращения: 23.11.2015.
5. Смердов А. А. Біомедичні вимірювальні перетворювачі : навч. посібник / А.А. Смердов, Є. В. Сторчун. - Львів: Кальварія, 1997. – 112с.
6. Щербань И. В. Измерительно-информационные системы : уч. пособие / И. В. Щербань. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. – 80с.

### References

1. DSTU 22-21-23. Elektrody dlia zniattia bioelektrychnykh potensialiv. Terminy i vyznachennia.
2. Fedotov A.A. Matematicheskoe modelirovanie s analiz pogreshnostej izmeritelny'x preobrazovatelej biomedicinskix signalov / A.A. Fedotov, S.A. Akulov. – M.: Fizmatlit, 2013. – 282 p.
3. Monastyrskiy Z.Ya. Osoblyvosti vzhivannia ukrainskoi metrolohichnoi terminologii v naukovo-tekhnichnii literature ta dokumentatsii / Z.Ya. Monastyrskiy // Hidroenergetyka Ukrainy. – 2010. – №4. – P.55-56.
4. Natsional'ny'j otkry'ty'j institute INTUIT. Lekciya 1: ot prosty'x sensorov – k intellektual'ny'm. Rezhim dostupa : <http://www.intuit.ru/studies/courses/590/446/lecture/9914?page=4>. Data obrashheniya : 23.11.2015.
5. Smerdov A.A.

Рецензія/Peer review : 24.11.2015 р.

Надрукована/Printed :13.12.2015 р.

## ПІДСИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЛІКАРЕМ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ

*В статті розглянуто принципи побудови підсистеми підтримки прийняття рішень для інформаційної технології, функціональну IDEF0-діаграму створення підсистеми підтримки прийняття рішень (ПППР) та характеристику умов функціонування такої підсистеми.*

*Показано, що наявність в структурі діалогового інтерфейсу «лікар-ПППР-експерт» компоненти отримання знань забезпечує їх надходження не тільки до вирішувача ПППР, а і до професійної бази знань лікаря. Поетапний аналіз процесу проектування підсистеми ПППР у вигляді IDEF0-діаграми дозволяє розробляти функціональну і процесну моделі, що в свою чергу, зумовлює побудову бази знань за модульним принципом.*

*Введення до структури процесу проектування ПППР процедури пошуку рішення (вибору альтернатив) за раніше визначеними критеріями і перевіркою заключного рішення на його відповідність креативним функціям, носить попереджувальний характер, оскільки інформує лікаря про можливість наявності в прийнятому ним рішенні помилки і необхідності повторення процедури вибору нового або корегування вже прийнятого.*

*Ключові слова: інформаційні технології, професійний відбір, електронний документообіг, підсистема підтримки прийняття рішень*

S.V. TYMCHUK

Vinnitsia national technical university

### SUBSYSTEM DECISION SUPPORT FOR DETERMINING THE DOCTOR HUMAN HEALTH

*In the article the principles of decision support subsystem for information technology, functional IDEF0-diagram creation PPPR operating conditions and characteristics of this subsystem.*

*It is shown that the presence in the structure of the dialog interface "doctor-software-expert" components gaining knowledge provides them not only to income PPPR decider, but also to professional knowledge base doctor. Step by step analysis of the subsystem design PPPR as IDEF0-chart allows to develop functional and process models, which in turn leads to building a knowledge base in a modular fashion.*

*Introduction to the structure of the design process PPPR search procedure decision (choosing alternatives) on previously defined criteria and verification of a final decision on its compliance creative features, is precautionary in nature, because informing the doctor about the possibility of the presence of his decision errors and the need for repeat procedures for selecting new or correction already adopted.*

*Keywords: information technology, professional selection, electronic document management*

### Вступ

При проектуванні підсистеми підтримки прийняття рішення лікаря, яка є невід'ємною частиною розробленої технології, будемо застосовувати методологію системного моделювання на базі CASE-технологій, а саме, стандарту SADT та методології IDEF [1], які призначені для вирішення завдань моделювання складних систем, що дозволяють відображати та аналізувати моделі діяльності широкого спектру складності систем в різних розрізах. Сімейство стандартів IDEF вміщує в себе 14 методологій, із яких ми будемо використовувати наступні: IDEF0 - методологію функціонального моделювання, яка дозволяє представити систему, що досліджується, у вигляді набору взаємопов'язаних моделей; IDEF1 – методологію моделювання інформаційних потоків в середині технології, які дозволяють відображати та аналізувати їх структуру і взаємозв'язки; IDEF1X – методологію моделювання баз даних на основі моделі «сутність-зв'язок», що застосовується при побудові інформаційної моделі; IDEF3 – методологію документування процесів, що проходять в системі з описом сценаріїв і послідовності операцій для кожного процесу. IDEF3 має прямий взаємозв'язок з IDEF0- кожна функція (функціональний блок), якої може бути представлена у вигляді окремого процесу засобами IDEF3; IDEF4 - методологію побудови об'єктно-орієнтованих систем, що дозволяють відображати структуру об'єктів і закладені принципи їх взаємодії [1].

### Основний текст статті

Метод системного моделювання дозволяє описати предметну область у вигляді системного проекту з використанням мови SADT [1]. При цьому проектуються та аналізуються три базові моделі: функціональна, інформаційна та динамічна, що супроводжується семантичним ланцюгом термінів. При описі функціонального складу системи окремі функції доводяться до алгоритмів, процедур.

Однак завжди є функції, які пов'язані з прийняттям рішень в умовах невизначеності.

Для формалізації виконання таких функцій використовують експертні системи та підсистеми підтримки прийняття рішень (ПППР). Умови доцільності та можливості створення ПППР для розробленої технології можуть бути сформульовані наступним чином.

1. Задача діагностики та ідентифікації здоров'я студентів достатньо складна, а її вирішення потребує нетривіальних міркувань.

2. Поставлена проблема відноситься до добре структурованої області, в якій можна виділити поняття, визначення, ставлення і способи діагностики та ідентифікації.

3. Відомо, що існує достатня кількість лікарів і фахівців в даній галузі, які можуть виконувати функції експертів.

4. Не вимагає додаткової аргументації твердження про те, що створення ПППР істотно полегшить процедуру прийняття достатніх лікарських рішень для менш кваліфікованого персоналу, виключивши тим самим, появу лікарської помилки.

5. Наявність в структурі ПППР діалогового інтерфейсу «лікар-ПППР-експерт» містить компоненту отримання знань, через яку знання експерта надходять не тільки до вирішувача ПППР, де переробляються і надходять в базу знань, а поповнюють професійну базу знань лікаря, що в кінцевому підсумку сприяє підвищенню якості медичної допомоги.

Створювана ПППР проектується на принципі системного підходу і найбільш доцільному напрямку в розробленні МІС або МІТ, який передбачає розроблення технології математиками, програмістами, інженерами спільно з медичним персоналом [2].

Побудову ПППР для інформаційної технології проведемо відповідно до методології IDEF0 [1] і представимо процес проектування у вигляді IDEF0-діаграми (рис. 1).

*Перший етап* – аналіз проблеми – включає в себе осмислення і сприйняття проблеми, на рішення якої направлена технологія, її структуризацію, взаємодію з іншими захворюваннями, оцінку об'ємів інформації, яка існує та ступінь її достатності, попередній вибір знань і даних для формування в подальшому відповідних БЗ і БД.

*Другий етап* – в класичному представленні - це етап виявлення прихованих медичних знань, який передбачає пошук і виявлення певних закономірностей між наявними даними, виділення сталих зв'язків в них. Однак, на наш погляд, в такій інтерпретації і цільовій установці ми зіткнемося з надлишком інформації, яка буде знайдена і класифікована як «приховані знання», але в подальшому використовуватися не буде. Тому в проєктованій нами технології та ПППР другий етап функціональної діаграми визначений як моделювання захворювань, який передбачає побудову моделі передбачуваного захворювання і вже з її допомогою визначає: а) чи достатньо наявних медичних знань для переходу до третього етапу чи ні; б) якщо недостатньо, то формує перелік конкретних відсутніх знань; в) якщо достатньо, то переходить відразу до третього етапу, формулювання цілей і задач дослідження.

*Третій етап* - формулювання мети і задач - передбачає визначення головної мети - ідентифікувати здоров'я студентів в умовах його навчальної діяльності у ВНЗ та сформулювати для цього перелік задач, вирішення яких і забезпечить досягнення необхідної мети.

*Четвертий етап* - визначення критеріїв, принципів і вимог, відповідно до яких можна класифікувати студентів на групи однорідності за фізичним розвитком, функціональним станом і фізичною працездатністю.

*П'ятий етап* – формування безлічі альтернатив – груп однорідності студентів за діагнозом, видом захворювання, рівнем фізичного розвитку, ступенем фізичної працездатності, і т.ін.

*Шостий етап* – аналіз альтернатив має фактично два етапи: визначає приналежність студентів до тієї чи іншої групи однорідності, вибирає найкращу альтернативу (рішень) з числа згенерованих і здійснює перевірку на наявність в прийнятому рішенні хоча б однієї із проактивних функцій.

Як уже відзначалось, в методології IDEF передбачено процес - не моделювання IDEF3, яке дозволяє описати логіку взаємодії інформаційних потоків і взаємовідносини між процесами обробки інформації та об'єктами, що є частинами цих процесів. Результатом моделювання є процесна модель, яка дозволяє деталізувати функціональну модель (рис. 1) до окремих робіт. Процесна модель відображає причинно-наслідковий зв'язок рішень, що приймаються – процедури прийняття рішень, і визначає місця, де користувачу необхідно оцінити множину альтернатив прийняття рішень з метою вибору найкращого.

Процесна модель «Прийняття рішення про вибір найкращої альтернативи» фактично складається із 2-х рівнів декомпозиції і формування множинних альтернатив і вибору альтернатив (ідентифікації і визначення рівня здоров'я).

В якості вхідної інформації на першому рівні декомпозиції використовуються принципи побудови і критерії оцінювання, які ґрунтуються таким чином за групами однорідності, що кожен альтернативу можна оцінити тільки за критеріями, які її визначають, що дає змогу класифікувати множини за фізичним розвитком, функціональним станом і фізичною працездатністю (рис. 2).

На другому рівні декомпозиції здійснюється пошук рішення (вибір альтернатив) за раніше визначеними критеріями і перевірка заключного рішення на його відповідність креативним функціям. Ця процедура носить попереджувальний характер, інформує лікаря про наявність в затвердженому ним рішенні можливих помилок і пропонує або повторити процедуру прийняття рішення з уточненням або коригуванням «сумнівних» етапів або зібрати додатково експертів і повести медичний консиліум (рис. 3).

Таким чином, розробка функціональної і процесної моделей дозволяє побудувати базу знань за модульним принципом, що по аналогії з [3] забезпечує збереження БЗ в окремо зберігаємих файлах і їх використання у декількох додатках, а також дає можливість модулям селективно активуватися і деактивуватися, що сприяє виключенню із розгляду правил неактивних модулів [3].

Експертна система, що використовується в ПППР, має класичну конфігурацію (рис. 4) [4] і включає в себе: механізм логічного виводу (МЛВ) або інакше інтерпретатор, вирішувач; робочу пам'ять (робочу БД): базу знань (БЗ); підсистему пояснень; інтерфейс користувача; підсистему отримання і поповнення знань;

підсистему моделювання зовнішнього світу і підсистему взаємодії із зовнішнім світом.

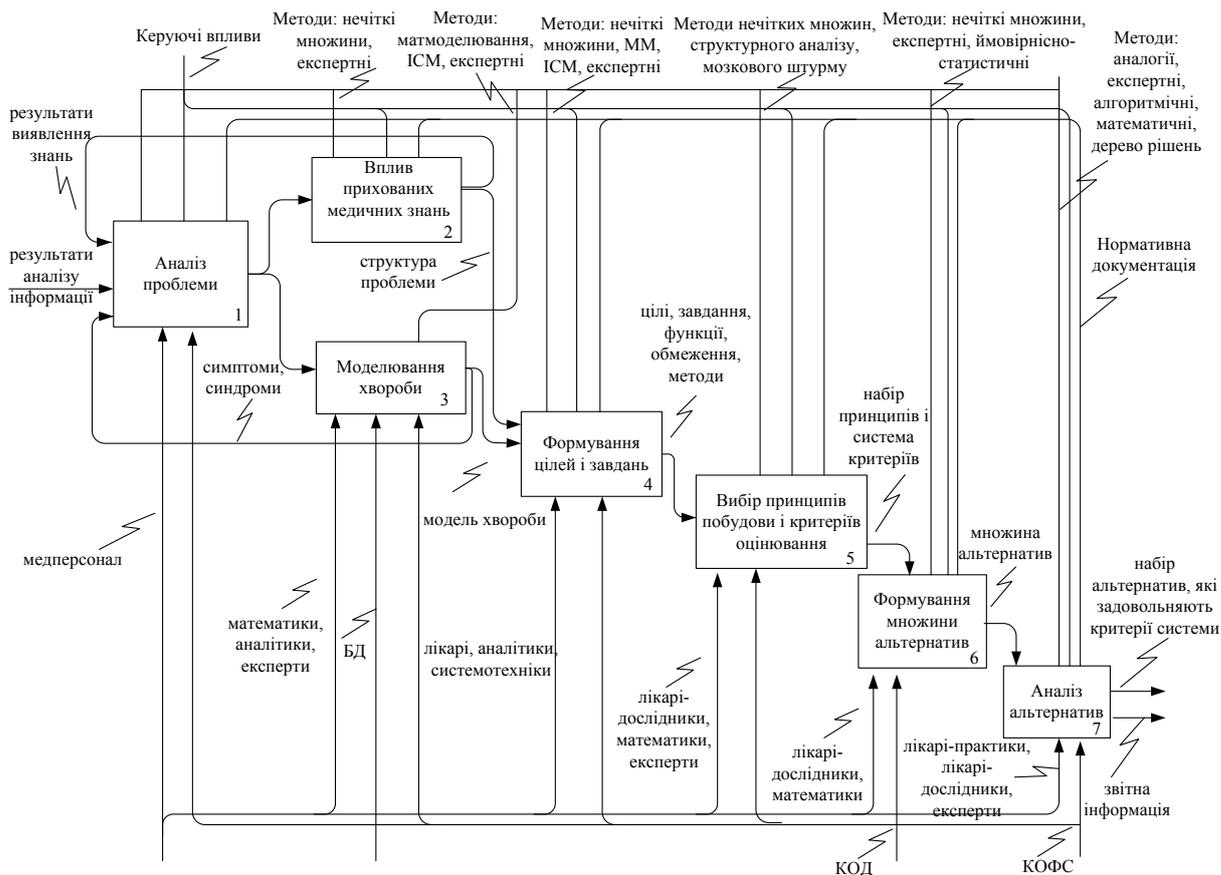


Рис. 1. Функціональна IDEF0-діаграма створення ПППР

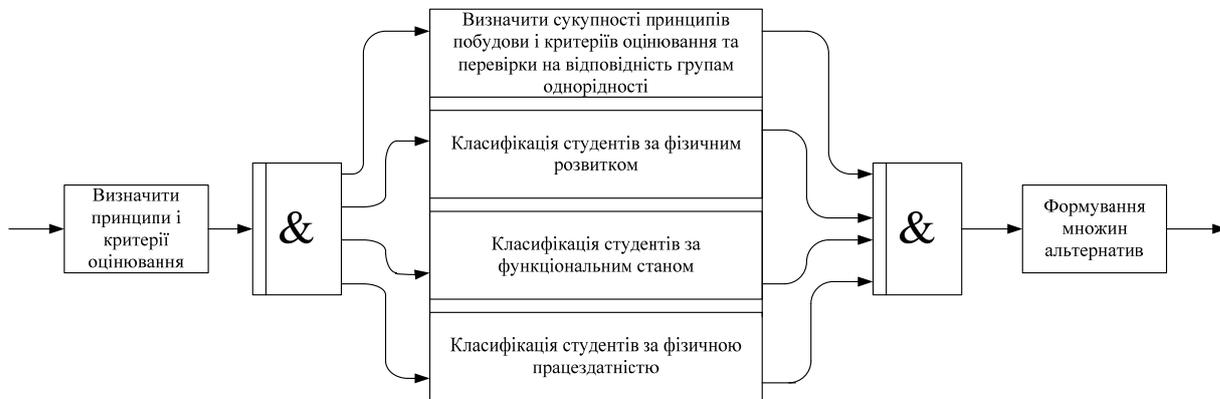


Рис. 2. Рівень декомпозиції А.1.1 – формування множини альтернативи

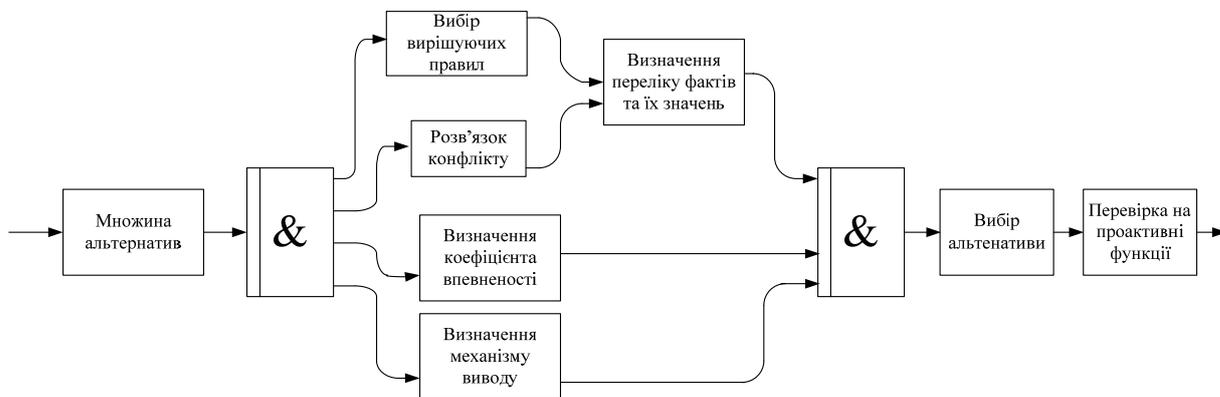


Рис. 3. Рівень декомпозиції А.2.1 – Вибір альтернативи і перевірка на проактивні функції

В розгорнутому вигляді експертну систему (рис. 1) можна представити таким чином (рис. 5).

Призначення ПППР:

- надавати лікарю пояснення щодо вибраного рішення (обґрунтування діагностичної гіпотези);
- надавати лікарю додаткову інформацію щодо діагнозу, схеми лікування, медичних призначень, прогнозування перебігу захворювання тощо;
- формувати рекомендації по створенню персонального плану лікування на основі первинної інформації;
- ідентифікувати діагноз серед множини наявних нозологічних форм;
- оцінювати взаємодію і взаємовплив симптомів і синдромів;
- обробляти суб'єктивні лікарські оцінки при ранжуванні якісно оцінюваних симптомів;
- визначати рівень фізичної працездатності;
- визначати та ідентифікувати рівень фізичного здоров'я.

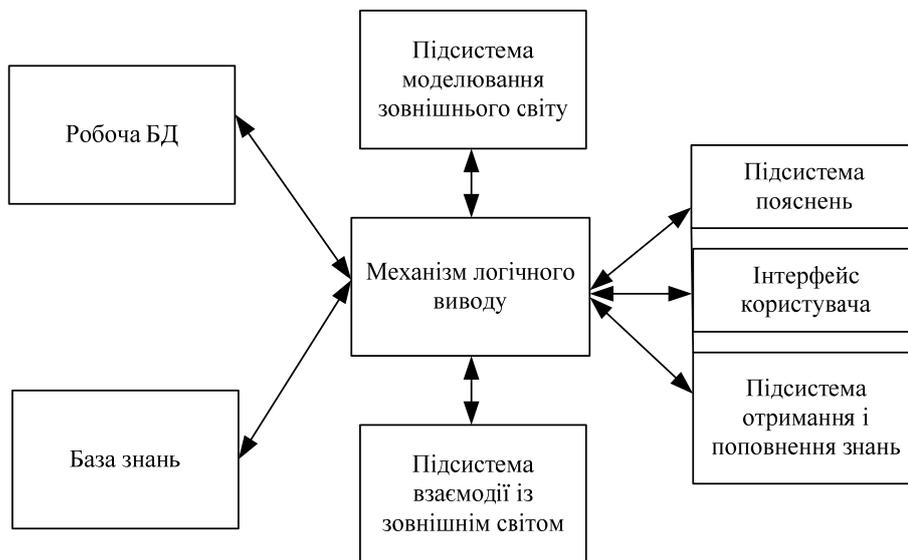


Рис. 4. Структурна схема експертної системи

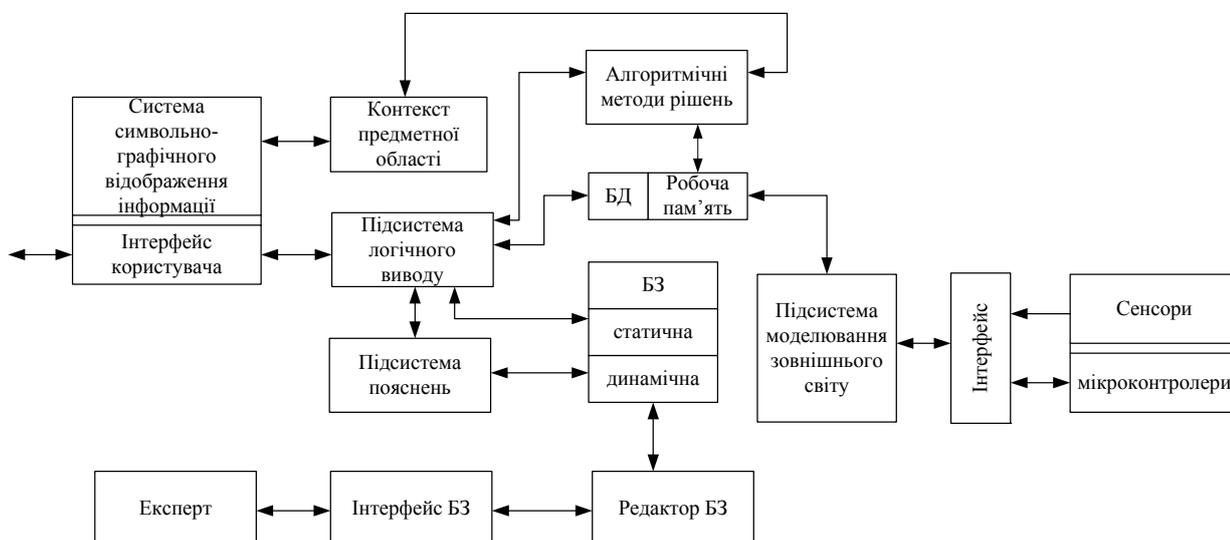


Рис. 5. Розгорнута схема експертної системи

Функціональні можливості підсистеми ПППР: диференціальна діагностика захворювань і станів; оброблення і прийняття рішень по біомедичних зображеннях; функціонування в режимі телемедичного консилиуму; вибір методів лікування; вибір і розрахунок доз та умов застосування медикаментозних засобів; функціонування в режимі «проактивні функції», результатом яких є виведення на екран монітора попереджувальних повідомлень, у випадках, коли рішення лікаря несуть загрозу або ризики погіршення стану здоров'я пацієнтів.

Характеристика умов функціонування ПППР: невизначеність, коли інформація, що необхідна для прийняття рішення має не кількісний, а якісний характер; дефіцит часу, коли термін часу, відведений на оброблення даних і прийняття рішень, не відповідає умовам ситуації, що виникла; багатокритеріальність, коли в підсистемі ПППР не передбачено функцію вибору та оптимізації критеріїв, орієнтованих на реальний клінічний випадок; неякісний підбір експертів, або їх низький професійний рівень; використання до

прийняття рішень різнорозмірної медичної інформації; велика кількість альтернатив вибору.

Режими функціонування ПППР: режим отримання і поповнення знань; режим рішення задачі або консультування.

Підсистема логічного виводу забезпечує формування заключення щодо прийнятого рішення, тобто, отримує нові факти на основі співставлення вихідних даних із робочої БД і знань із бази знань. Теоретично основою механізму логічного виводу слугує теорія машина Поста [4].

### Висновки

Отримала подальший розвиток підсистема підтримки прийняття рішень шляхом застосування експертної системи і процесного моделювання IDEF, результатом якого є процесна модель, що відображає причинно-наслідковий зв'язок рішень, які приймаються (процедури прийняття рішень) і визначає місце, де, як і коли лікарю необхідно оцінити множину альтернатив прийняття рішень для вибору найкращого рішення, автоматизує процес наповнення експертної системи знаннями, що забезпечує адаптацію бази знань ПППР до умов її функціонування

Запропоновано реляційну модель базу даних у вигляді комплексу баз даних для підтримки функціонування інформаційного забезпечення технології, структура яких відповідає функціональній організації технології і представляє собою масиви текстових, числових і візуальних даних, які дають змогу організувати процес моніторингу та прийняття рішень лікарем щодо визначення стану здоров'я людини.

### Література

1. Автоматизация управления компаниями. Описание стандарта IDEFO. – Режим доступа: <http://www.insapov.ru/idef0-standard-description.html>. – Дата обращения: 23.11.2015.
2. Кобринский Б. А. Логика аргументации в принятии решений в медицине / Б. А. Кобринский. // НТИ, сер. 2. – 2001. – № 9. – С. 1-8.
3. Ильясов Б. Г. Модульная структура базы знаний экспертной системы «Выбор специальности при поступлении в ВУЗ» / Б. Г. Ильясов, Е. Б. Старцева, Н. Р. Янгуразова // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2006. – №2. Режим доступа: – URL: [http://ogbus.ru/authors/Ilyasov/Ilyasov\\_1.pdf](http://ogbus.ru/authors/Ilyasov/Ilyasov_1.pdf). – Дата обращения: 16.11.2015.
4. Портал искусственного интеллекта, работы с искусственным интеллектом. Структура экспертной системы – Режим доступа: – URL: <http://www.aiportal.ru/articles/expert-systems/structure.html>. – Дата обращения: 16.11.2015.

### References

1. Avtomatizaciya upravleniya kompaniyami. Opisaniye standarta IDEFO. – Rezhim dostupa : <http://www.insapov.ru/idef0-standard-description.html>. – Data obrashheniya : 23.11.2015.
2. Kobrinskiy B. A. Logika argumentatsii v prinyatii reshenij v medicine / B. A. Kobrinskiy // NTI, ser.2. – 2011. – №9. – p.1-8.
3. Ilyasov B. G. Modulnaya struktura bazy znanij e'kspertnoj sistemy "Vy'bor special'nosti pri postuplenii v VUZ" / B. G. Ilyasov, E. B. Starceva, N. R. Yangurazova // E'lektronny'j nauchny'j zhurnal "Neftegazovoe delo", 2006. – №2. – Rezhim dostupa : URL: [http://ogbus.ru/authors/Ilyasov/Ilyasov\\_1.pdf](http://ogbus.ru/authors/Ilyasov/Ilyasov_1.pdf). – Data obrashheniya : 16.11.2015.
4. Portal iskusstvennogo intellekta, roboty s iskusstvenny'm intellektom. Struktura e'kspertnoj sistemy'. – Rezhim dostupa : URL: <http://www.aiportal.ru/articles/expert-systems/structure.html>. – Data obrashheniya : 16.11.2015

Рецензія/Peer review : 14.11.2015 р.

Надрукована/Printed :15.12.2015 р.

**РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕРИТРОЦИТУ  
ЯК ОБ'ЄКТА ВИМІРЮВАНЬ ЛАЗЕРНИХ ДІАГНОСТИЧНИХ СИСТЕМ**

У роботі було визначено оптичні характеристики моделі еритроциту: коефіцієнт розсіяння в залежності від розміру частинки та показника заломлення для розробки та аналізу математичної моделі еритроциту на основі вектор-параметра Стокса і матриці розсіювання світла (MPC), формалізму T-матриці, який базується на лінійності рівнянь Максвелла.

Ключові слова: математична модель, вектор-параметр Стокса, матриця розсіювання світла (MPC), формалізм T-матриці.

M. F. BOGOMOLOV, O.V. STARODUB

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

**DEVELOPMENT AND ERYTHROCYTE ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS  
AS OBJECTS MEASUREMENTS LASER DIAGNOSTIC SYSTEMS**

*Abstract - Development of methods, algorithms, software and hardware for the analysis of blood cells - red blood cells based on advanced optoelectronic and laser technologies that provide high efficiency and accuracy of research. The work was defined optical characteristics of model erythrocytes: scattering coefficient depending on the size of the particles and refractive index for the development and analysis of mathematical models of erythrocytes from vector-Stokes parameters and scattering of light (MRS) formalism T-matrix based on linear equations Maxwell. The mathematical model can be used to identify the status of red blood cells, because with different size and shape of erythrocytes appearance scattering coefficient for different shapes and different characteristics of the particles. Thus, we can distinguish between normal and abnormal red blood cells, allowing the early stages quickly and efficiently diagnose diseases such as hemolytic anemia, septicemia, and disseminated intravascular coagulation.*

*Keywords: mathematical model, Stokes vector-parameter matrix light scattering (MRS) T-matrix formalism.*

Математичне моделювання є найбільш загальним методом дослідження в науці, а самі математичні моделі в достатній мірі адекватно відображають і описують дослідний об'єкт, процес чи явище. Важливою характеристикою шуканої математичної моделі є її універсальність при застосуванні. Розробка методик, алгоритмів, програмного забезпечення та технічних засобів для аналізу стану формених елементів крові – еритроцитів на базі сучасних оптико-електронних та лазерних технологій забезпечують високу оперативність, точність та неінвазивність досліджень. Проте для коректної постановки задачі розсіювання необхідно враховувати інтенсивність і поляризацію випромінювання, що досягається введенням вектор-параметра Стокса і матриці розсіювання світла (MPC)[1].

Пружна взаємодія частинки з плоскою гармонічною хвилею може бути описана як лінійне перетворення параметрів Стокса  $(I_i, Q_i, U_i, V_i)$  падаючого випромінювання, результатом якого є параметри Стокса  $(I_s, Q_s, U_s, V_s)$  розсіяного випромінювання [1]:

$$\begin{pmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{pmatrix} = \frac{1}{k^2 r^2} F \begin{pmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{pmatrix}, \tag{1.1}$$

де F – матриця розсіювання світла розміром  $4 \times 4$ .

Потрібно зазначити, що параметри Стокса для світла, розсіяного сукупністю випадково розташованих не взаємодіючих частинок, представляє собою суму параметрів Стокса для світла, розсіяного окремими частинками, а матриця розсіювання для такої сукупності є сума матриць окремих частинок.

MPC для хаотично орієнтованих сфероїдальних частинок, згідно [2], має шість незалежних параметрів:

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & 0 & 0 \\ -f_{12} & f_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_{33} & -f_{43} \\ 0 & 0 & f_{43} & f_{44} \end{pmatrix}. \tag{1.2}$$

MPC довільних однорідних сферичних частинок має вісім відмінних від нуля елементів, при чому лише три незалежних:

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & 0 & 0 \\ -f_{12} & f_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_{33} & f_{34} \\ 0 & 0 & -f_{34} & f_{33} \end{pmatrix}, \tag{1.3}$$

$$f_{11}^2 = f_{12}^2 + f_{33}^2 + f_{34}^2.$$

В ряді робіт досліджено вплив форми і орієнтації частинок, що розсіюються, на матриці розсіювання світла середовищами типу природних аерозолів і гідрозолів.

Кутові залежності МРС для багатьох видів частинок виміряні експериментально. Так, експериментально вимірялись кутові залежності елементів матриці не агрегованих еритроцитів при умові квазіоднократності розсіювання. Умови квазіоднократності розсіювання досягались використанням тонкої (7 мкм) кювети, в яку було поміщено еритроцити. Вимірювання проводились на автоматизованому поляризаційному нефелометрі, який дозволяє виміряти кутові залежності всіх 16 елементів матриці розсіяного світла[3].

Оптичні вимірювання крові ґрунтуються на оптичних властивостях поглинання крові. Середній показник поглинання показує ряд відповідних фізіологічних властивостей крові, таких як ступінь насичення киснем, концентрація гемоглобіну і інших розчинених речовин, що поглинають світло, характерних для крові, пов'язаних із станом здоров'я пацієнта. Вимірювання поглинання оптичних властивостей крові часто виконуються шляхом реєстрації відбитого або поглинутого світла, або аналізу зразка крові або перфузії тканин крові. Для того, щоб пов'язати вимірювані величини (коефіцієнт пропускання і/або віддзеркалення) з поглинальним параметром крові застосовуються декілька теоретичних моделей розсіяння, наприклад, транспортне рівняння апроксимації розсіювання або Монте-Карло.

Інтерес до розсіюючих властивостей крові зростає, оскільки вони дають важливу інформацію щодо морфологічних властивостей клітин крові.

Для отримання інформації на мікроскопічному рівні, як наприклад розмір клітки або форма, необхідна точна модель, яка розглядає розсіювання світла від кожної окремої клітки. Такі методи засновані на вирішенні рівнянь Максвелла для об'єкту з формою подібної клітини, але кожен застосовує різні наближення, потрібні для отримання кутового розподілу розсіяного світла. Вибір моделі ґрунтується на властивостях модельованого об'єкту, які визначають наближення.

Розмір еритроцитів в 10 разів більше довжини хвилі в оптичному діапазоні, а це означає, що ні розсіяння Релея, що складається з наближення дійсного для малих розсіювачів порівняно з довжиною хвилі, ні теорія геометричної оптики для великих розсіювачів не можуть успішно застосовуватися. Замість цього для еритроцитів застосовуються інші наближені моделі, такі як дифракція Фраунгофера, аномальна дифракція і розсіяння Релея-Ганса-Дебая, а також точні вирішення рівнянь Максвелла для однорідної або шаруватої сфери, тобто Лоренц-теорії Мі. Останній метод застосовується для оцінки впливу розміру випадково орієнтованих еритроцитів на оптичні властивості розсіювання, виконуються обчислення Мі на різних сферах еритроцитів еквівалентного розміру і порівнюється теоретично отримані властивості розсіювання і виміряні. Успішні результати цього дослідження показують, що розмір, а не форма впливає на розсіяння світла від суспензії з випадково орієнтованими частинками. Проте, випадкова орієнтація еритроцита експериментально рідко реалістична, а оптичні вимірювання часто виконуються на рухомій крові. Розглядають еритроцит у формі диска, асиметричні форми частинок впливають на кутовий розподіл розсіяного світла. Такі параметри, як напрям і ступінь вирівнювання частинок в порівнянні з напрямом падаючого світла, а також форми частинок грають важливу роль в оцінці оптичних вимірювань потоку крові. З метою вивчення впливу форми клітки на розсіяння світла застосовується Т-матричний формалізм, який полягає в тому, що, використовуючи складені відображення полів, отримуємо відношення між коефіцієнтами розповсюдження для випадкових і розсіяних полів.

Електричні поля, з довжиною хвилі в середовищі  $\lambda$ , повинні задовольняти рівняння Максвелла, представлені у векторному рівнянні Гельмгольца:

$$\nabla \times \nabla \times E - k^2 E = 0, \quad (1.4)$$

де  $k = 2\pi/\lambda$  – хвилеве число. Для сфероїдального об'єкту розсіювання основні функції - сферичні хвильові вектори  $M_v$  і  $N_v$ , де  $v$  представляє сферичну гармоніку з індексами  $m$  та  $n$ . Цими функціями задаються, якщо використовується тимчасова залежність  $e^{-i\omega t}$  ( $\omega = 2\pi c/\lambda$ , де  $c$  швидкість світла):

$$\begin{aligned} M_v^0(r) &= \nabla \times r e^{-im\phi} P_n^m(\cos\theta)(j_n(kr) + in_n(kr)) \\ N_v^0(r) &= k^{-1} \nabla M_v(r) \end{aligned} \quad (1.5)$$

Нормальні хвильові вектори  $N_v^r(r)$  й  $M_v^r(r)$  мають чисту Бесселеву функцію радіальної залежності. Випадкове поле в навколишньому середовищі є постійним і таким чином збільшується в постійних хвилях:

$$E_i(k_{surmed} r) = E_0 \sum_v D_v (a_v M_v^r(k_{surmed} r) + b_v N_v^r(k_{surmed} r)), \quad (1.6)$$

де  $E_0$  - амплітуда випадкового поля,  $D_v$  - нормальна постійна,  $a_v$  и  $b_v$  - коефіцієнти розповсюдження. Коефіцієнти  $a_n$  й  $b_n$  виражаються в термінах пов'язаних з функціями Легендре і їх похідними. Внутрішнє поле в межах об'єкту збільшується на тих же постійних хвильових векторах:

$$E_{int}(k_{object}^r) = E_0 \sum_{\mu} (c_{\mu} M_{\mu}^r(k_{object}^r) + d_{\mu} N_{\mu}^r(k_{object}^r)), \quad (1.7)$$

де  $\mu$  сполучає два показники сферичних гармонік приведених раніше і  $c_{\mu}$  й  $d_{\mu}$  - коефіцієнти розповсюдження внутрішнього поля. Розсіяне поле затухає і збільшується в затухаючих сферичних хвилях, тобто, використовуються функції Ньютмана в рівнянні:

$$E_s(k_{surmed}^r) = E_0 \sum_{\nu} (f_{\nu} M_{\nu}^0(k_{surmed}^r) + g_{\nu} N_{\nu}^0(k_{surmed}^r)), \quad (1.8)$$

де  $f_{\nu}$  й  $g_{\nu}$  - коефіцієнти розповсюдження, що характеризують розсіяне поле[4].

З рівняння (1.8) шляхом множення відомих коефіцієнтів розповсюдження отримуємо матрицю переходу, або T-матрицю:

$$\begin{pmatrix} f_{\nu} \\ g_{\nu} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} T - \\ matrix \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{\nu} \\ b_{\nu} \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

Таким чином, рішення скорочується до обчислень коефіцієнтів розповсюдження розсіяного поля і елементів T-матриці. Внутрішнє поле приймаємо як індуковані потоки поляризації в межах сфероїда, який у свою чергу проводить випадкове поле. Таким чином, зв'язок між розсіяним і випадковим полем, математично виражається T-матрицею, фізично знаходиться у внутрішньому полі. Щоб спростити математичний аналіз, внутрішні потоки поляризації замінюються еквівалентним розподілом електричних і магнітних потоків на поверхні об'єкту. В результаті приголосній теоремі еквівалентності отримуємо результуюче поле, що дорівнює нулю в межах об'єкту розсіювання. Розсіяне поле - поверхневі інтегралі, пов'язані з поверхневими потоками, які у свою чергу пов'язані з випадковим полем через теорему еквівалентності. Це означає, що збільшення коефіцієнтів розсіяного поля відносяться до тих внутрішніх полів, які можуть бути виражені в матричній формі таким чином:

$$\begin{pmatrix} f_{\nu} \\ g_{\nu} \end{pmatrix} = -i \begin{pmatrix} B - \\ matrix \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{\mu} \\ d_{\mu} \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

Елементи B-матриці складаються з поверхневих інтегралів поверхневих потоків. Крім того, коефіцієнти розповсюдження внутрішнього поля пов'язані з тими випадковими полями, які відповідають теоремі еквівалентності:

$$\begin{pmatrix} A - \\ matrix \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{\mu} \\ d_{\mu} \end{pmatrix} = -i \begin{pmatrix} a_{\nu} \\ b_{\nu} \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

Елементи A-матриці також складаються з поверхневих інтегралів. T-матриця оброблює і об'єднує ці два кроки, пов'язуючи коефіцієнти розповсюдження випадкового поля безпосередньо з коефіцієнтами розповсюдження розсіяного поля:

$$\begin{pmatrix} f_{\nu} \\ g_{\nu} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} B - \\ matrix \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A - \\ matrix \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} a_{\nu} \\ b_{\nu} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} T - \\ matrix \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{\nu} \\ b_{\nu} \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

Елементи T-матриці обчислюються поверхневими інтегралами. Крім того, коли об'єкт розсіювання симетричний осі сфероїда, поверхневі інтегралі можуть бути спрощені до просторових лінійних інтегралів, спрощуючи подальші обчислення. У разі сферичних об'єктів діагональ і елементи T-матриці можуть бути обчислені аналітично. Явний вираз розсіяного поля тоді ідентично отримане відповідно до теорії Мі[5].

Формалізм T-матриці, описаний вище, забезпечує точне рішення задачі світлового розсіювання симетричними по осях об'єктів, за умови, що області в рівнянні (1.7) - (1.8) розширені в нескінченному числі елементів. В результаті отримуємо T-матрицю нескінченного розміру і, застосовуючи практичні обчислення, скорочуємо нескінченний ряд. З цього виходить, що потрібно розглядати наближені параметри для досягнення правильного рішення в межах необхідної точності. Часто використовуються три параметри наближення. Перевірка наближень має особливе значення, оскільки обчислення T-матриці для великих об'єктів вимагають дуже точних обчислень елементів матриці, так само як великих матриць. Початкові маленькі числові помилки можуть дати інший результат з явними помилками в завершальній T-матриці. Застосування одиничної точності в обчисленнях T-матриці приводить до гарної точності для маленьких (в порівнянні з довжиною хвилі) і слабо асферичних сфероїдів розмірами  $x < 25$  і осьовими відношеннями близькими до одиниці. Обчислення T-матриці сфероїдальних частинок з подібною формою і об'ємом для великих (в порівнянні з довжиною хвилі), високо асферичних еритроцитів раніше не були можливі. Міщенко і Тревіс [6] показали, що для досягнення достатньо високої точності до 2-2.7 разів великих розмірів, використовують розширену точність (32-розрядні числа).

Тому необхідно розширити діапазон параметрів розміру, включаючи розширену точність використовуваних змінних. Проте, оскільки розширену точність нелегко включити в реальні і уявні частини складних змінних, вибирається реальна частина [5]. Це виключає вибір моделювання результату світлового поглинання в межах сфероїда, що розсівається, і його дію на розсіяне поле, оскільки світлове поглинання виражається уявним коефіцієнтом поглинання. Для оцінки впливу світлового поглинання розроблені розрахунки з подвійною точністю змінних (16-розрядні числа), дозволяючи включати складні коефіцієнти заломлення [5]. Це дозволяє порівнювати результати обчислень і без поглинання для сфероїдів розміру

такого ж, як і в розрахунках з подвійною точністю, але з осьовими відносинами ближче до одиниці.

Вирази для складових поля зовнішньої розсіяної хвилі можна записати у вигляді:

$$E_{\theta} = H_{\varphi} = -\frac{i}{kr} e^{-ikr+i\omega t} \cos\varphi S_2(\theta),$$

$$-E_{\varphi} = H_{\theta} = -\frac{i}{kr} e^{-ikr+i\omega t} \sin\varphi S_1(\theta),$$

де

$$S_1(m, x, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot n + 1}{n \cdot (n + 1)} \cdot (a_n \cdot \pi_n(\cos \theta) + b_n \cdot \tau_n(\cos \theta)),$$

$$S_2(m, x, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot n + 1}{n \cdot (n + 1)} \cdot (b_n \cdot \pi_n(\cos \theta) + a_n \cdot \tau_n(\cos \theta)),$$

де  $\theta$  - кут розсіювання, визначається направленням падаючих хвиль, центром розсіювання й напрямком спостереження.

Коефіцієнт розсіювання визначається за наступною формулою:

$$K_{роз} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n + 1) \left\{ |a_n|^2 + |b_n|^2 \right\}, \quad (1.14)$$

де  $x$  - дифракційний параметр частинки, який визначається як  $x = \frac{k}{r}$ , при  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $r$  - радіус частинки;  $\lambda$  - довжина хвилі.

Вирази для коефіцієнтів розсіяних хвиль  $a_n$  і  $b_n$ :

$$a_n = \frac{\psi_n(x)\psi'_n(mx) - m\psi_n(mx)\psi'_n(x)}{\zeta_n(x)\psi'_n(mx) - m\psi_n(mx)\zeta'_n(x)}, \quad (1.15)$$

$$b_n = \frac{m\psi_n(x)\psi'_n(mx) - \psi_n(mx)\psi'_n(x)}{m\zeta_n(x)\psi'_n(mx) - \psi_n(mx)\zeta'_n(x)}, \quad (1.16)$$

де  $m$  комплексний показник заломлення сферичної частинки стосовно навколишнього зовнішнього середовища, який записується у вигляді:

$$m = n + i\chi, \quad (1.17)$$

$n$  - дійсна частина показника заломлення;

$\chi$  - уявна частина показника заломлення.

Для обчислення функцій  $\Psi_n$  та  $\xi_n$  і їх похідних користуються відомими рекурентними співвідношеннями:

$$\Psi_{n+1}(x) = \frac{2n+1}{x} \Psi_n(x) - \Psi_{n-1}(x), \quad (1.18)$$

$$\xi_{n+1}(x) = \frac{2n+1}{x} \xi_n(x) - \xi_{n-1}(x).$$

Однак багатократне використання залежності (1.18) при обчисленні  $\Psi_n(x)$  від малих  $n$  до великих супроводжується швидким накопиченням відносної похибки.

Для розрахунку функцій  $\Psi_n$  та  $\xi_n$  може використовуватись вихідна рекурсія (1.18). Знаючи

$$\xi_0(x) = \sin(x) - i \cos(x), \quad \xi_1(x) = \frac{\sin x}{x} - \cos x - i \left( \sin x + \frac{\cos x}{x} \right), \quad (1.19)$$

$$\Psi_0(x) = \sin x, \quad \Psi_1(x) = \frac{\sin x}{x} - \cos x,$$

де  $x = kr$  - дифракційний параметр частинки;

Використовуючи рекурентні співвідношення (1.18) та знаючи(1.19) було виведено та записано вирази для визначення  $\Psi_n$  та  $\xi_n$ .

Таким чином для  $\Psi_n$  маємо наступні вирази:

$$\Psi_0 = \sin x,$$

$$\Psi_1 = \frac{\sin x}{x} - \cos x,$$

$$\Psi_2 = \left(\frac{3}{x^2} - 1\right) \sin x - \frac{3}{x} \cos x,$$

$$\Psi_3 = \left(\frac{15 - 6x^2}{x^3}\right) \sin x + \left(\frac{15}{x^2} + 1\right) \cos x,$$

$$\Psi_4 = \left(\frac{105}{x^4} - \frac{45}{x^2} + 1\right) \sin x + \left(\frac{105}{x^3} + \frac{10}{x}\right) \cos x.$$

Запишемо вирази для  $\xi_n$  :

$$\xi_0 = \sin x - i \cos x,$$

$$\xi_1 = \frac{\sin x}{x} - \cos x - i\left(\sin x + \frac{\cos x}{x}\right),$$

$$\xi_2 = \left(\frac{3}{x^2} - 1\right) \sin x - \frac{3}{x} \cos x - i\left(\frac{3}{x} \sin x + \left(\frac{3}{x^2} + 1\right) \cos x\right),$$

$$\xi_3 = \left(\frac{15}{x^2} - 6\right) \frac{\sin x}{x} + \frac{15}{x^3} \cos x + i\left(1 - \frac{15}{x^2}\right) \left(\sin x + \frac{\cos x}{x}\right),$$

$$\xi_4 = \left(\frac{135}{x^4} - \frac{57}{x^2} + 1\right) \sin x - \frac{3}{x} \left(\frac{45}{x^3} + 1\right) \cos x - i\left(\frac{3}{x} \left(\frac{45}{x^2} - 2\right) \sin x + \left(\frac{135}{x^4} - \frac{6}{x^2} + 1\right) \cos x\right).$$

Запишемо вирази для коефіцієнтів  $\pi_n(\theta)$  :

$$\pi_0(\theta) = 0,$$

$$\pi_1(\theta) = 1,$$

$$\pi_2(\theta) = 3 \cos \theta,$$

$$\pi_3(\theta) = \frac{15 \cos^2 \theta - 3}{2},$$

$$\pi_4(\theta) = \frac{35 \cos^3 \theta}{2} - \frac{15}{2} \cos \theta.$$

Запишемо вирази для коефіцієнтів  $\tau_n(\theta)$  :

$$\tau_0(\theta) = 0,$$

$$\tau_1(\theta) = \cos \theta,$$

$$\tau_2(\theta) = 3 \cos 2\theta,$$

$$\tau_3(\theta) = \frac{15}{2} \cos^3 \theta - \frac{3}{2} \cos \theta - 15 \sin^2 \theta \cos \theta,$$

$$\tau_4(\theta) = \frac{35}{2} \cos^4 \theta - \frac{21}{2} \cos^2 \theta - \frac{105}{2} \sin^2 \theta \cos^2 \theta - \frac{21}{2} \sin^2 \theta + 3 \cos 2\theta.$$

### Висновки

При розробці математичної моделі необхідно було визначити оптичні характеристики моделі еритроциту: коефіцієнт розсіяння в залежності від розміру частинки та показника заломлення. Вихідними даними для розрахунку були оптичні характеристики крові, зокрема показники поглинання й розсіювання, та параметри еритроцитів.

Розроблена математична модель може застосовуватись для виявлення стану еритроцитів у крові, завдяки тому, що при різному розмірі та формі еритроциту вигляд коефіцієнта розсіювання для різних форм та характеристик частинок відрізнятиметься. Тому на основі отриманих даних можна оцінити розмір частинки, а також судити про її форму, маючи зображення коефіцієнтів розсіювання, які були обраховані за допомогою введених виразів для функцій  $\Psi_n$ ,  $\xi_n$ , в залежності від показника заломлення. Тобто можна розрізняти патологічні та нормальні еритроцити, що дозволяє на ранніх стадіях швидко та якісно діагностувати такі захворювання як гемолітична анемія, септицемія, синдром ДВС.

**Література**

1. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 660 с.
2. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами: Пер. с англ. — М.: Из-во иностр. лит., 1961. – 536 с.
3. В. Н. Лопатин, А. В. Приезжев, А. Д. Апонасенко, Н. В. Шепелевич, В. В. Лопатин, П. В. Пожиленкова, И. В. Простакова. Методы светорассеяния в анализе дисперсных биологических сред - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 384 с.
4. Рысаков В., Стонь М. Рассеяние света взвесью частиц: IV. Предельные возможности и определения параметров взвесей методом рассеяния света // Оптика и спектр. – №2. – с. 305-309.
5. Annika M.K. Nilsson, Peter Alsholm, Anders Karlsson and Stefan Andersson-Engels «T-matrix computations of light scattering by red blood cells», Sweden, 2001.
6. Michael I.Mishenko, Larry D. Travis «Capabilities and limitations of a current fortran implementation of the T-matrix method for randomly oriented, rotational symmetric scatterers», NY, 1998.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М: Наука, 1974. – 832 с.

**References**

1. Bohren, D. Hafmen absorption and scattering of light by small particles / Trans. from English. - M.: Mir, 1986. - 660 p.
2. G. Van de Hulst scattering of light by small particles: Trans. from English. - M.: Because of foreign. Lighted., 1961. 536 p.
3. V.N. Lopatin, A.V. Priezzhev, A.D. Aponasenko, N.V. Shepelevich, V.V. Lopatin, P.V. Pozhilenkova, I.V. Prost. Light scattering techniques in the analysis of dispersed biological media - M.: FIZMATLIT, 2004. -384 p.
4. Trotters B., Stoney M. Light scattering particles suspension: IV. Extreme performance and determine the parameters of suspensions by light scattering // Optics and spectrum. - №2. - p. 305-309.
5. Annika M.K. Nilsson, Peter Alsholm, Anders Karlsson and Stefan Andersson-Engels «T-matrix computations of light scattering by red blood cells», Sweden, in 2001.
6. Michael I.Mishenko, Larry D. Travis «Capabilities and limitations of a current fortran implementation of the T-matrix method for randomly oriented, rotational symmetric scatterers», NY, 1998.
7. Korn G., Korn T. Handbook of mathematics for scientists and engineers. - M: Nauka, 1974. - 832 p.

Рецензія/Peer review : 15.11.2015 p.

Надрукована/Printed :19.12.2015 p.

## ІНТЕГРОВАНА МЕТОДОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ МЕДИКО-ДІАГНОСТИЧНИХ СИСТЕМ

*У статті представлено результати досліджень із визначення інтегрованої методології створення медико-діагностичних систем.*

*Проаналізовано сучасні методології створення медико-діагностичних систем для клінічної діагностики патології організму людини на мікрорівні, зокрема томографічної діагностики онкологічних захворювань, патології головного мозку, та серцево-судинних патологій організму людини. Проаналізовано шляхи, які надають інтегрований характер методології створення медико-діагностичних систем. Запропоновано інтегрувати у такій послідовності етапи створення медико-діагностичних систем: медико-біологічний, фізико-хімічний та інженерний. Запропоновано інтегровану методологію, в основу якої покладено метод контролю та діагностики стану виконання етапів та інтегрованого створення медико-діагностичної системи і визначення причин невиконання інтегрованої методології.*

*Ключові слова: методологія, медико-діагностичні системи, медико-біологічна методологія, фізико-хімічна методологія, інженерна методологія, радіотехнічна методологія, інтегрована методологія, метод контролю та діагностика.*

Y.V. SAVENKO

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

### INTEGRATED METHODOLOGY FOR CREATING THE MEDICAL-DIAGNOSTIC SYSTEMS

*Abstract — The paper presents the results of investigation on determine the integrated methodology for creating the medical-diagnostic system.*

*It has been analyzed the current state of clinical diagnostics of diseases of the human body at the microlevel, in particular by tomography diagnostics of cancer, diseases of the brain and cardiovascular pathology of the human body. It has been analyzed ways, which give to methodology an integrated character for creating the medical-diagnostic systems. It has been proposed to integrate stages of creating the medical-diagnostics systems by such sequence: medical-biological stage, physical-chemical stage, engineering stage. It has been proposed the integrated methodology based on techniques of check and diagnostics of completion state of stages and an integrated creation the medical-diagnostic systems and determine the reason of non-completion integrated methodology.*

*Keywords: methodology, medical-diagnostic systems, medical-biological methodology, physical-chemical methodology, engineering methodology, radio engineering methodology, integrated methodology, techniques of check and diagnostics.*

### Вступ

Методологія створення медико-діагностичних систем потребує інтегрування для задоволення потреб в галузі охорони здоров'я, зокрема діагностування захворювань на ранніх стадіях їх виникнення та їх профілактики.

Результати клінічної діагностики методами ультразвукової діагностики, комп'ютерної томографії, магнітно-резонансної томографії та позитронно-емісійної томографії містять інформацію про структурні та функціональні особливості біологічного об'єкту та відображають теперішні можливості діагностики організму людини на макрорівні [1-4].

Вивчення сучасного стану клінічної діагностики патологій організму людини на мікрорівні, зокрема томографічної діагностики онкологічних захворювань, патології головного мозку, та серцево-судинних патологій організму людини дозволяє стверджувати, що створення медико-діагностичних систем суттєво відстає від появи нових викликів в галузі охорони здоров'я.

### Постановка задачі дослідження та шляхи вирішення проблеми

Пошук нових шляхів швидкого й ефективного забезпечення потреб охорони здоров'я медико-діагностичними системами приводить до необхідності критичного перегляду методологій їх створення.

Створення медико-діагностичних систем відбувається на окремих етапах із відповідними для них методологіями [5-7]. Так можна виділити для створення медико-діагностичних систем медико-біологічний, фізико-хімічний та інженерний етапи. Відповідно до таких етапів застосовують медико-біологічну, фізико-хімічну та інженерну методології. Виконання етапів характеризується високою ступеню розінтегрованості та специфічності методологій. Створення відбувається паралельно або послідовно із невизначеністю порядку та слабкою узгодженістю результатів, що знижує рівень швидкого й ефективного забезпечення потреб охорони здоров'я медико-діагностичними системами

Вирішення проблеми може бути шляхом інтегрування етапів із визначеною послідовністю та інтегрованою методологією (Рис. 1).

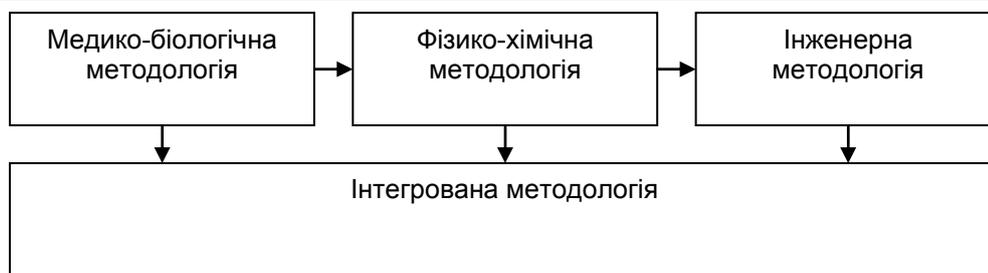


Рис. 1. Схема інтегрованої методології створення медико-діагностичних систем

У випадку створення медико-діагностичних систем на основі радіотехнічних систем інженерний етап та методологія замінюються на радіотехнічний етап та методологію.

#### Метод контролю та діагностики інтегрованої методології

Важливою складовою інтегрованої методології створення медико-діагностичних систем для забезпечення її нормальної реалізації є метод контролю та діагностики, який визначає стан виконання окремого етапу (медико-біологічного, фізико-хімічного та радіотехнічного) та інтегрованого створення медико-діагностичної системи і визначення причин невиконання інтегрованої методології з заданою глибиною.

Метод контролю та діагностики інтегрованої методології може бути функціональним чи тестовим, що визначається характером даних для перевірки. Функціональний метод контролю та діагностики використовує функціональні дані для перевірки, які отримані на певному етапі виконання інтегрованої методології. Тестовий метод контролю та діагностики використовує тестові дані для перевірки, які отримані як статистичні дані виконання інтегрованої методології.

Контроль і діагностика виконання етапів інтегрованої методології створення медико-діагностичних систем припускає певну ідеалізацію, при якій виділяються деякі істотні (для контролю й діагностики) характеристики й відкидаються другорядні, тобто реальне створення медико-діагностичної системи замінюється моделлю.

При пошуку невиконання етапів інтегровану методологію представляють у вигляді функціональної моделі або функціонально-логічної схеми. Функціональна модель характеризується набором функціональних елементів та зв'язків. Під функціональним елементом розуміють частину інтегрованої методології (метод, методика, алгоритм, перетворення, функція, операція), що може перебувати тільки в одному із двох станів: виконано або не виконано. При побудові функціональної моделі виходять із заданої імовірності локалізації невиконання етапу інтегрованої методології з урахуванням конструктивних особливостей створення конкретної медико-діагностичної системи.

Вихідними даними для побудови функціональної моделі є: схема інтегрованої методології, схема контролю й діагностики інтегрованої моделі; опис методів, методик, алгоритмів на яких базується інтегральна методологія створення медико-діагностичних систем; задана глибина пошуку невиконання елементу інтегрованої методології.

При побудові функціональних моделей необхідно керуватися наступними правилами:

- у кожному функціональному елементі повинні бути відомі значення (номінальні, допуски) вхідних і вихідних параметрів, їхня функціональна залежність і спосіб контролю;
- при виході із припустимих меж хоча б одного із вхідних параметрів з'являється вихідний параметр, що також виходить із припустимих меж;
- функціональний елемент моделі інтегрованої методології вважається невиконаний, якщо при всіх вхідних параметрах, що лежать у припустимих межах, на його виході з'являється параметр, значення якого виходять із припустимих меж;
- значення зовнішніх вхідних параметрів завжди перебувають у межах допусків;
- якщо вихідний параметр функціонального елемента  $i$  є вхідним для функціонального елемента  $j$ , то значення цих параметрів збігаються;
- лінії зв'язку між функціональними елементами абсолютно надійні;
- будь-який первинний функціональний елемент моделі може мати тільки один вихідний параметр при довільному кінцевому числі вхідних параметрів.

Інтегрована методологія створення медико-діагностичних систем характеризується визначеною множиною параметрів. По ступеню узагальнення інформації про стан виконання елементу методології, що діагностується, параметри підрозділяють на первинні, вторинні і проміжні.

Первинні параметри мають самий низький ступінь узагальнення і є параметрами елементів інтегрованої методології, що діагностується. Вторинні параметри мають самий високий ступінь, узагальнення інформації про виконання елементу інтегрованої методології, що діагностується, і є вихідними параметрами інтегрованої методології – це визначальні параметри. Проміжні параметри дозволяють здійснювати зв'язок між вторинними і первинними параметрами. Кількість контрольованих параметрів визначається задачами контролю і діагностики.

Стан виконання інтегрованої методології створення медико-діагностичних систем

характеризується декількома визначальними параметрами (вторинними і проміжними), по яких оцінюються її можливості виконувати інтегроване створення медико-діагностичних систем. Для виявлення визначальних параметрів часто необхідно виконати значні теоретичні дослідження варіанту інтегрованої методології, що діагностується.

При пошуку локального стану і причини не виконання інтегрованої методології необхідна детальна інформація про стан елементів інтегрованої методології, що вимагає контролю більшого числа параметрів, ніж при контролі стану виконання.

При прогнозуванні стану виконання необхідно мати ще більший обсяг інформації про стан інтегрованої методології. У цьому випадку потрібно знати не тільки стан елементів інтегрованої методології, значення їх параметрів, але і закони зміни параметрів, у тому числі і в часі. Тому при прогнозуванні контролюють ще більше параметрів і стежать за зміною їх у часі.

В якості методу контролю та діагностики стану виконання інтегрованої методології створення медико-діагностичних систем використано метод статистичної оптимізації за критерієм максимальної імовірності відмови (не виконання) параметра із сукупності обраних для контролю параметрів об'єкта діагностування. Цей метод дозволяє оптимізувати кількість контрольованих параметрів і установити черговість їхнього контролю. Відповідно до методу проводиться аналіз виконання інтегрованої методології, що діагностується, на основі якого встановлюються вхідні і вихідні параметри і планується вихідна кількість параметрів.

Послідовність контролю параметрів встановлюється починаючи з максимального значення імовірності не виконання в порядку зменшення. Послідовність контролю параметрів варіанту інтегрованої методології, що діагностується, має особливо велике значення при створенні автоматизованих медико-діагностичних систем. При цьому вона визначає обсяг програми контролю, складність програмно-керуючих і комутуючих пристроїв, пристроїв пошуку несправностей і т.п.

При пошуку невиконання кожна доцільна перевірка подає визначену інформацію, що вказує на можливі причини невиконання, і обмежує область, у якій повинна проводитися наступна перевірка стану інтегрованої методології створення медико-діагностичних систем.

#### **Класифікація алгоритмів визначення стану виконання інтегрованої методології**

В задачах технічної діагностики визначення (розпізнавання) стану об'єкту зводиться до вирішення задачі віднесення цього стану до одного з можливих класів (типових станів, діагнозів) [8-10]. Кількість таких класів визначається особливостями конкретної задачі та цілями дослідження (цілями діагностування). Інтегрована методологія для створення медико-діагностичних систем є об'єктом діагностування. В одних випадках здійснюється дослідження з метою визначення стану виконання інтегрованої методології, тобто вибору (розпізнавання) одного з двох можливих станів: "виконано" або "не виконано". Такий процес називається диференціальною діагностикою. В інших випадках слід більш детально охарактеризувати непрацездатний стан невиконання інтегрованої методології, наприклад при прогнозуванні стану виконання в наступний період часу. Для діагностики стану виконання інтегрованої методології вказані класи встановлюються заздалегідь. При цьому задачу розпізнавання називають задачею класифікації.

Сукупність методик (дій) для розпізнавання називають методом розпізнавання. Існує два основних класи таких методів – *імовірнісні* і *детерміністські*. Використання того чи іншого класу методів визначається конкретними умовами діагностування, варіантом інтегрованої методології. Імовірнісні методи є більш загальні, більш повно відображають реальну ситуацію, пов'язану з необхідністю вибору в умовах обмеженого обсягу інформації, але для їх реалізації необхідно мати значно більше (ніж при використанні детерміністських методів) попередньої (ап'юріорної) інформації про інтегровану методологію створення медико-діагностичних систем.

#### **Імовірнісний метод визначення стану виконання інтегрованої методології**

Імовірнісний метод визначення стану виконання інтегрованої методології формулюється наступним чином. Інтегрована методологія створення медико-діагностичних систем знаходиться в одному з  $n$  випадкових станів  $S_i$ . Відома сукупність ознак  $z_j$  (або параметрів  $y_j$ ), кожний з яких з визначеною імовірністю характеризує відповідний стан інтегрованої методології. Необхідно побудувати правило прийняття рішення, за допомогою якого пред'явлена сукупність ознак була б віднесена до одного з можливих станів. При цьому бажано також оцінити достовірність прийнятого рішення та ступень ризику прийняття помилкового рішення.

Серед імовірнісних методів визначення стану виконання інтегрованої методології створення медико-діагностичних систем найбільший інтерес представляє метод оснований на узагальненій формулі Байеса. Також може бути використаний метод послідовного аналізу, запропонований Вальдом.

Метод на узагальненій формулі Байеса має перевагу завдяки своїй простоті та ефективності. До найбільш суттєвих недоліків алгоритму слід віднести необхідність значного обсягу попередньої інформації та «пригнічення» станів, що зустрічаються рідко. Однак у випадках, коли обсяг статистичних даних дозволяє використання узагальненої формули Байеса, цей алгоритм виявляється найбільш надійним та ефективним.

Розглянемо стан  $S_i$  об'єкту діагностування і ознаку  $z_j$ , яка зустрічається при цьому стані.

Імовірність сумісної появи цих подій (тобто наявність стану  $S_i$  та ознаки  $z_j$ ) визначатиметься як

$$P(S_i, z_j) = P(S_i) / P(z_j / S_i) = P(z_j) / P(S_i / z_j)$$

Звідси випливає формула Байєса

$$P(S_i / z_j) = P(S_i) \frac{P(z_j / S_i)}{P(z_j)} \quad (1)$$

Визначимо зміст кожної з величин, що входять до формули (1).

$P(S_i)$  - імовірність стану  $S_i$ . Визначається за статистичними даними (апріорна імовірність стану).

Так, якщо попередньо було обстежено  $N$  об'єктів і у  $N_i$  об'єктів спостерігався стан  $S_i$ , то

$$P(S_i) = N_i / N$$

$P(z_j / S_i)$  - імовірність появи ознаки  $z_j$  об'єктів, що знаходяться у стані  $S_i$ . Так, якщо серед  $N_i$  об'єктів, які знаходяться у стані  $S_i$ , у  $N_{ij}$  виявлено ознаку  $z_j$ , то

$$P(z_j / S_i) = N_{ij} / N_i$$

$P(z_j)$  - імовірність появи ознаки  $z_j$  у всіх об'єктів, незалежно від того, в якому стані вони перебувають. Так, якщо із загальної кількості  $N$  об'єктів ознака  $z_j$  виявлена  $N_j$  об'єктів, то

$$P(z_j) = N_j / N$$

Для прийняття рішення щодо стану  $S_i$  спеціальний розрахунок  $P(S_i)$  не потрібен. З подальшого буде зрозуміло, що при визначенні для всіх можливих станів величинах  $P(S_i)$  і величина  $P(z_j)$  визначається однозначно.

В виразі (1)  $P(S_i / z_j)$  - імовірність стану  $S_i$  після того, як стало відомо про наявність у об'єкта ознаки  $z_j$  (апостеріорна імовірність стану).

Узагальнена формула Байєса відноситься до випадку, коли дослідження ведуться по комплексу ознак  $Z$ , що включає ознаки  $z_1, z_2, \dots, z_n$ . Кожна з ознак  $z_j$  має  $m_j$  розрядів  $(z_{j1}, z_{j2}, \dots, z_{js}, \dots, z_{jm})$ .

Наприклад, для випадку, коли мова йде про стан виконання або не виконання елемента інтегрованої методології для всіх ознак  $m = 2$ :

$$z_1 = 1 \text{ (стан виконання), } z_2 = 0 \text{ (стан не виконання).}$$

В результаті дослідження об'єкту стає відомою реалізація ознаки  $Z_j^* = Z_{js}$  і усього комплексу ознак  $Z^*$  (індексом \* позначена конкретна реалізація ознаки).

Формула Байєса для комплексу ознак набуває вигляду

$$P(S_i / Z^*) = P(S_i) \frac{P(Z^* / S_i)}{P(Z^*)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

де  $P(S_i / Z^*)$  - імовірність стану  $S_i$  після того, як стали відомі результати дослідження об'єкту за комплексом ознак  $Z$ ;  $P(S_i)$  - отримана за результатами попередніх досліджень об'єкту (попередньої статистики) імовірність стану  $S_i$ .

Формула (2) відноситься до будь-якого з  $n$  можливих станів об'єкту. Якщо припустити, що об'єкт знаходиться лише в одному з вказаних станів, отримуємо:

$$\sum_{s=1}^n P(S_s) = 1$$

Відмітимо, що в деяких задачах діагностики допускають існування об'єкту в кількох станах одночасно. Це ускладнює задачу, бо необхідно розглядати кожну з комбінацій окремих станів об'єкту.

### Висновки

Інтегрований характер методології створення медико-діагностичних систем досягається завдяки запропонованому інтегруванню у визначеній послідовності медико-біологічної, фізико-хімічної та інженерної (радіотехнічної) методологій, що характеризується єдністю методологічної мети та дозволяє швидко й ефективно забезпечення потреб охорони здоров'я медико-діагностичними системами.

Метод контролю та діагностики стану виконання інтегрованої методології створення медико-діагностичних систем характеризується єдністю математичного апарату для всіх складових (медико-

біологічної, фізико-хімічної та інженерної) інтегрованої методології, що дозволяє визначити стан та причини виконання (не виконання) окремих елементів та інтегрованої методології в цілому. Метод дозволяє досягти швидкого й ефективного забезпечення потреб охорони здоров'я медико-діагностичними системами.

Досягнення позитивного ефекту можливо лише при комплексному використанні запропонованої інтегрованої методології з урахуванням особливостей конкретної медико-діагностичної системи та конкретного варіанту інтегрування медико-біологічної, фізико-хімічної та інженерної (радіотехнічної) методологій.

### Література

1. Rao SM, Binder JR, Hammeke TA, et al. Somatotopic mapping of the human primary motor cortex with functional magnetic resonance imaging. *Neurology* 1995;45:919-24.
2. Friston KJ, Fletcher P, Josephs O, Holmes A, Rugg MD, Turner R. Event-related fMRI: characterizing differential responses. *Neuroimage* 1998;7:30-40.
3. Van der Linden A, Verhoye M, Van Audekerke J, et al. Non invasive in vivo anatomical studies of the oscine brain by high resolution MRI microscopy. *J Neurosci Methods* 1998;81:45-52.
4. Flitman S, O'Grady J, Cooper V, Grafman J. PET imaging of maze processing. *Neuropsychologia* 1997;35:409-420.
5. Ахутин В.М. Биотехнические системы: теория и проектирование / В.М. Ахутин. – Л., 1981. – 220 с.
6. Разработка, производство и техническое обслуживание медицинской техники. Часть 1. Приборы, аппараты, оборудование и технологии для исследования физиологических и биохимических параметров организма / Ю. Г. Герцик, С. А. Кайдалов, Г. Я. Герцик. – М.:Изд-во "Рудомино". – 284 с.
7. Разработка, производство и техническое обслуживание медицинской техники. Часть 2. Приборы, аппараты, оборудование и технологии для визуализации органов и тканей / Е. Г. Амброзевич, Ю. Г. Герцик, В. Е. Сеницын, А. В. Потемкин. – М.:Изд-во "Рудомино". – 312 с.
8. Леонов А.И.. Основы технической эксплуатации бытовой радиоэлектронной аппаратуры / А.И. Леонов, Н.Ф. Дубровский. – М.: Легпромиздат, 1991. – 272 с.
9. Мірських Г.О. Контроль параметрів під час проектування, виробництва та експлуатації радіоелектронної апаратури. Навчальний посібник / Г.О. Мірських, Н.М. Руденко. – К., НТУУ "КПІ", 2009, - 140 с.
10. Федоров В.К. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В.К. Федоров, Н.П. Сергеев, А.А. Кондрашин. – М.: Издательство "Техносфера", 2005, – 504 с.

### References

1. Rao SM, Binder JR, Hammeke TA, et al. Somatotopic mapping of the human primary motor cortex with functional magnetic resonance imaging. *Neurology* 1995;45:919-24.
2. Friston KJ, Fletcher P, Josephs O, Holmes A, Rugg MD, Turner R. Event-related fMRI: characterizing differential responses. *Neuroimage* 1998;7:30-40.
3. Van der Linden A, Verhoye M, Van Audekerke J, et al. Non invasive in vivo anatomical studies of the oscine brain by high resolution MRI microscopy. *J Neurosci Methods* 1998;81:45-52.
4. Flitman S, O'Grady J, Cooper V, Grafman J. PET imaging of maze processing. *Neuropsychologia* 1997;35:409-420.
5. Akhutin V. M. Biotechnical systems: theory and design. – L., 1981. – 220 s.
6. Razrabotka, proizvodstvo I tehicheskoe obsluzhivanie meditsinskoj tehniki. Chast 1. Pribory, apparaty, oborudovanie i tehnologii dlja issledovaniya fiziologicheskix I biokhimicheskix parametrov organizma / Y. G. Gertsik, S. A. Kaidalov, G. Y. Gertsik. – M.: "Rudomino". – 284 s.
7. Razrabotka, proizvodstvo I tehicheskoe obsluzhivanie meditsinskoj tehniki. Chast 2. Pribory, apparaty, oborudovanie i tehnologii dlja vizualizatsii organov I tkaney / E. G. Ambrozevich, Y. G. Gertsik, V. E. Sinitsin, A. V. Potemkin. – M.: "Rudomino". – 312 s.
8. Leonov A. I., Dubrovskiy N. F. Osnovy tehicheskoy ekspluatatsii bytovoy radioelektronnoy apparatury.– M.: Legpromizdat, 1991. – 272 s.
9. Mirskiyh G. O., Rudenko N. M. Kontrol parametrov pid chas proektuvannya, vyrobnystva ta ekspluatatsii radioelektronnoji aparatury. Navchalnyi posibnyk. – K., NTUU"KPI", 2009, - 140 s.
10. Fedorov V. K., Sergeev N. P., Kondrashin A.A. Kontrol I ispytaniya v proektirovanii I proizvodstve radioelektronnyh sredstv. – M.: "Tehnosfera", 2005, – 504 s.

Рецензія/Peer review : 22.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 19.12.2015 р.

УДК 621.01:620.179.1

А.В. ГОРОШКО, В.П. РОЙЗМАН  
Хмельницький національний університет**СИНТЕЗ ДОПУСКІВ В ЗАДАЧІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ВИРОБНИЦТВА  
ЕЛЕМЕНТІВ ГЕРМЕТИЗОВНОЇ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ**

Показана актуальність проблеми забезпечення міцності герметизованої електронної апаратури на прикладі мікромодулей. Розроблена математична модель взаємодії резистора з компаундом у складі мікромодуля і виявлені первинні фактори, що впливають на величину виникаючих в матеріалах напружень. Розроблений метод пробних параметрів для ідентифікації фізико-механічних характеристик компаунда. Ідентифіковані фізико-механічні характеристики компаунда ЭЗК-25 увійшли в розроблену математичну модель як її уточнені параметри. За допомогою розробленого методу статистичної обробки даних, які не підкоряються унімодальним законам розподілу імовірностей, визначено обґрунтовані значення допустимих напружень в кераміці і компаунді. Розв'язана задача оптимізації допусків на фізико-механічні характеристики матеріалів і геометричні розміри конструкції резистор-компаунд, які гарантують міцність елементів конструкції. Запропоновані конструкторсько-технологічні шляхи забезпечення міцності конструкції резистор-компаунд, впроваджені на ВО «Новатор».

Ключові слова: допуски, мікромодуль, герметизована апаратура, фізико-механічні характеристики, обернена задача, ідентифікація, полі модальний розподіл, синтез

ANDRII VOLODYMYROVYCH GOROSHKO, VILEN PETROVICH ROYZMAN  
Khmelniyskiy National University, Ukraine**SYNTHESIS PROBLEM ADMISSION QUALITY PRODUCTION  
ELEMENTS HERMETYZOVNOYI ELECTRONICS**

Abstract - Shown relevance of pressurized ensure the safety of electronic equipment for example micromodules. The mathematical model of interaction with the resistor compound consisting Micromodules and identified the primary factors that influence the value of the materials emerging tensions. The method of test parameters to identify the physical and mechanical characteristics compound. Identifiable physical and mechanical characteristics of the compound ЭЗК-25 entered the developed mathematical model as its specified parameters. With the developed method of statistical data that do not obey the laws of probability distribution unimodal, determined reasonable value of allowable stress in ceramics and compounds. The problem of optimizing the tolerances on physical and mechanical properties of materials and geometric dimensions resistor-compound construction, which guarantee strength structural elements. The proposed design and technological ways of providing structural strength resistor-compound introduced in PA "Innovator".

Key words: tolerance, micromodules, sealed equipment, physical and mechanical characteristics, inverse problems, identification, modal field distribution, synthesis

**Вступ**

Герметизація елементів радіоелектронної апаратури (РЕА) широко використовується для підвищення надійності їх експлуатації в умовах змін температури, тиску, впливу вологи і т.п. Зокрема, в авіаційній і ракетній галузі в апаратурі керування використовуються герметизовані мікромодулі (ММ). До складу ММ входять металокерамічні резистори, які разом з іншими електрорадіоелементами (ЕРЕ) припаюються до плати. Герметизація виробу досягається поміщенням плати у металічний корпус і заповненням вільного простору у ньому компаундом, що адгезується із ЕРЕ, корпусом і выводами (рис. 1).

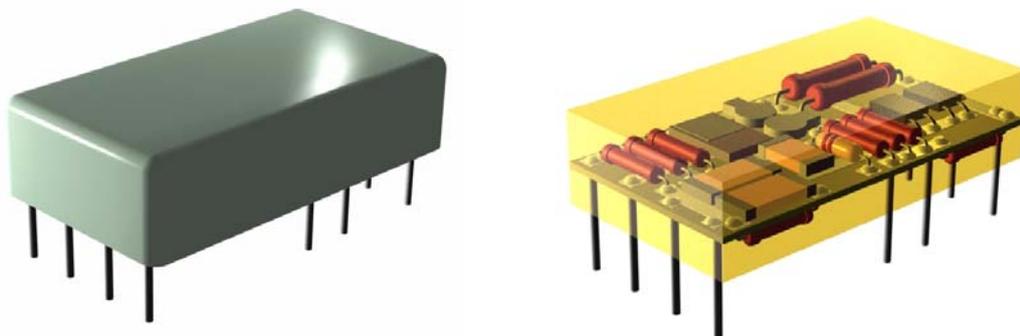


Рис. 1. Зовнішній вигляд і конструкція типового мікромодуля

В практиці випробувань і експлуатації ММ мали місце випадки руйнування кераміки резисторів. Такі дефекти викликали або обрив кола відразу, або так званий «меготливий» дефект, коли краї тріщини розходяться під впливом тих чи інших чинників, а за їх відсутності дотикаються, відновлюючи цілісність кола, і тим самим маскуючи поломку. Тяжкість наслідків дефектів у тому, що неможливо замінити елемент, який вийшов з ладу, і, відповідно, гине весь вузол або прилад, а часто і сам об'єкт, на якому цей прилад

розташований. В зв'язку з цим необхідно було виявити можливі причини виникнення таких дефектів і розробити методи їх усунення.

Дефектація зруйнованих резисторів і аналіз умов випробувань і експлуатації ММ, при яких відбуваються поломки, дозволили припустити, що причини дефектів є або наслідком існуючої технології складання ММ, або вони закладені в самій конструкції, тобто визначаються невдалим сполученням міцнісних властивостей з'єднувальних елементів, яке проявляється у певних умовах.

В зв'язку з цим в першу чергу було досліджено вплив низки технологічних операцій, таких як формовка, обрізка, лудіння, припайка виводів на зміну міцності елементів [84]. Проведенні експериментальні дослідження і статистична обробка їх результатів дозволили зробити висновок про те, що хоча деякі із операцій і знижують міцність елементів, це зниження, по-перше, з імовірністю 0,99 можна вважати несуттєвим, а по-друге, воно несуттєве у порівнянні з існуючим розкидом міцнісних характеристик резисторів, що постачаються.

Друге припущення полягало в тому, що поломки резисторів виникають від навантажень зі сторони компаунда. В процесі герметизації і випробувань при коливаннях температури відбувається природній стиск або розтяг матеріалів резистора і компаунда. Внаслідок існування сил адгезії на поверхні контакту і різниці у фізико-механічних характеристиках з'єднувальних матеріалів на границі їх розділу виникає контактний тиск, що викликає появу напружень. Встановлено, що перевищення цими напруженнями допустимих для заданих матеріалів значень і приводить до механічних пошкоджень елементів конструкції.

**Постановка задачі**

З метою усунення таких дефектів необхідно забезпечити в конструкції резистор-компаунд виконання умов міцності у матеріалах резистора і герметика. Для цього потрібно визначити такі первинні фактори, які впливають на величини напружень в матеріалах резистора і герметика, і знайти множину їх значень (допуски), які забезпечують виконання умов міцності

$$\sigma_{\max i} \leq [\sigma_i], i \in N \tag{1}$$

для кожної зі складових частин названої конструкції.

**Результати досліджень**

Перш за все необхідно визначити первинні фактори, що суттєво впливають на один із показників якості – міцність, і встановити функціональні залежності між ними і характеристиками міцності – напруженнями в матеріалах сполучених елементів. Розглянемо конструкцію системи ЕРЕ-герметик, представлену на рис. 2 і 3.

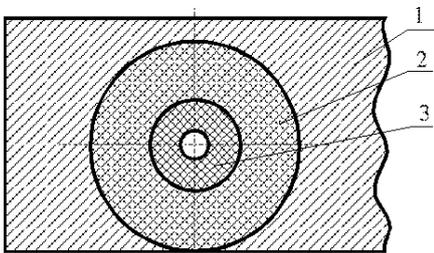


Рис. 2. Поперечний переріз електронного елемента, заполімеризованого компаундом:  
1 - компаунд,  
2 - виокремлений компаундний циліндр,  
3 - електронний елемент.

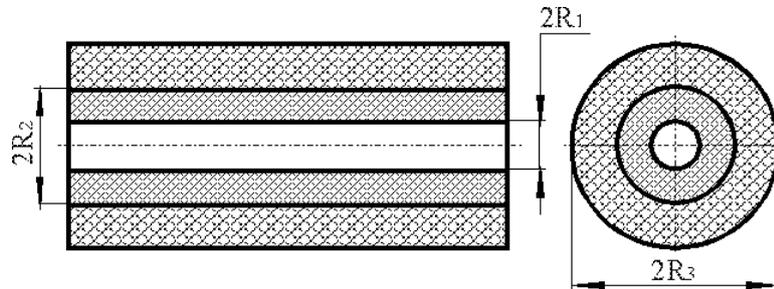


Рис. 3. ЕРЕ, оточений рівномірним шаром компаунду

В роботі [1] встановлено математичну модель взаємодії резистора з компаундом у складі ММ і виявлені первинні фактори, що впливають на величину виникаючих в матеріалах напружень. Математична модель розрахунку напружень зводиться до відомої схеми сполучних циліндрів (задачі Ляме-Гадоліна). Первинними факторами даної моделі поряд із геометричними розмірами системи елемент-компаунд  $R_1, R_2, R_3$  є фізико-механічні характеристики: коефіцієнт лінійного температурного розширення (КЛТР)  $\alpha_1, \alpha_2$ , коефіцієнт Пуассона  $\mu_1, \mu_2$  і модуль пружності  $E_1, E_2$  кераміки і компаунду відповідно. Контактний тиск в елементах конструкції резистор-компаунд при перепаді температур  $\Delta t$  визначається за формулою

$$P_{lk} = \frac{[(1 + \mu_1)\alpha_1 - (1 + \mu_2)\alpha_2] \Delta t}{\frac{[(1 + \mu_1)R_1^2 + (1 - \mu_1)R_2^2]}{E_1(R_2^2 - R_1^2)} + \frac{[(1 + \mu_2)R_3^2 + (1 - \mu_2)R_2^2]}{E_2(R_3^2 - R_2^2)}}, \tag{2}$$

Проведений авторами аналіз показав, що розкид значень фізико-механічних характеристик компаундів і кераміки при виробництві ММ може досягати 300% і залежить від багатьох факторів, як

наприклад, місце виготовлення складових компаунда. Крім того, характеристики компаундів в температурному діапазоні  $-60^{\circ}\text{C} \dots 20^{\circ}\text{C}$  взагалі невідомі, хоча вказані ММ експлуатуються за таких температур.

Зауважимо, що навіть найточніша математична модель може бути скомпрометована, якщо в неї підставляти неточні дані. Отже, в цих умовах було прийнято рішення експериментально уточнити параметри (первинні фактори) моделі. Для їх визначення був розроблений розрахунково-експериментальний метод пробних параметрів, що базується на ідентифікації фізико-механічних характеристик матеріалів шляхом вирішення зворотних задач міцності [2]. В методі пробних параметрів відносні деформації в матеріалах виробу, які в задачах традиційно розраховувались, визначаються експериментально і вважаються заданими, а фізико-механічні характеристики, що зазвичай входять у розрахункову модель як задані, вважаються шуканими. З використанням даного методу був розрахований вектор номінальних значень первинних факторів моделі

$$\mathbf{x}_0 = \{\alpha_{10}, \alpha_{20}, \mu_{10}, \mu_{20}, E_{10}, E_{20}, R_{10}, R_{20}, R_{30}\}. \quad (3)$$

Розраховані значення складових  $\mathbf{x}_0$  представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Номінальні значення первинних факторів конструкції резистор-компаунд

КЛТР		Коефіцієнти Пуассона		Модулі пружності		Геометричні розміри конструкції		
$\alpha_{10} \cdot 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>	$\alpha_{20} \cdot 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>	$\mu_{10}$	$\mu_{20}$	$E_{10} \cdot 10^5$ , МПа	$E_{20} \cdot 10^5$ , МПа	$R_{10} \cdot 10^{-3}$ , м	$R_{20} \cdot 10^{-3}$ , м	$R_{30} \cdot 10^{-3}$ , м
6	40	0,292	0,330	1,31	0,10	0,20	0,75	1,55

Далі необхідно було визначити обґрунтовані регламентовані значення вихідних характеристик моделі. З цією метою допустимі напруження в досліджуваних матеріалах встановлювали шляхом вимірювання зусиль, що руйнують керамічні основи резисторів і спеціальні зразки, виготовлені з компаунда, при розтягуючих (стискуючих) навантаженнях.

Статистична обробка результатів випробувань здійснювалась згідно розробленого авторами методу обробки даних, що підпорядковується багатомодальним законам розподілу (методу розщеплення сумішей) [3]. Розглянемо нормалізовану гістограму зусиль, що руйнують кераміку резисторів при розтягу, представлену на рис. 4. Для побудови нормалізованої гістограми, яка є емпіричною густиною розподілу (ГР), були виміряні зусилля руйнування кераміки 50-ти резисторів. По осі абсцис з кроком  $h=5$  Н відкладені значення руйнуючих кераміку зусиль  $P, H$ , а по осі ординат – густина відносної частоти  $n_i/nh$ , де  $n_i$  - кількість значень, що містяться в  $i$ -му інтервалі розбиття по осі абсцис,  $n=50$  - обсяг вибірки.

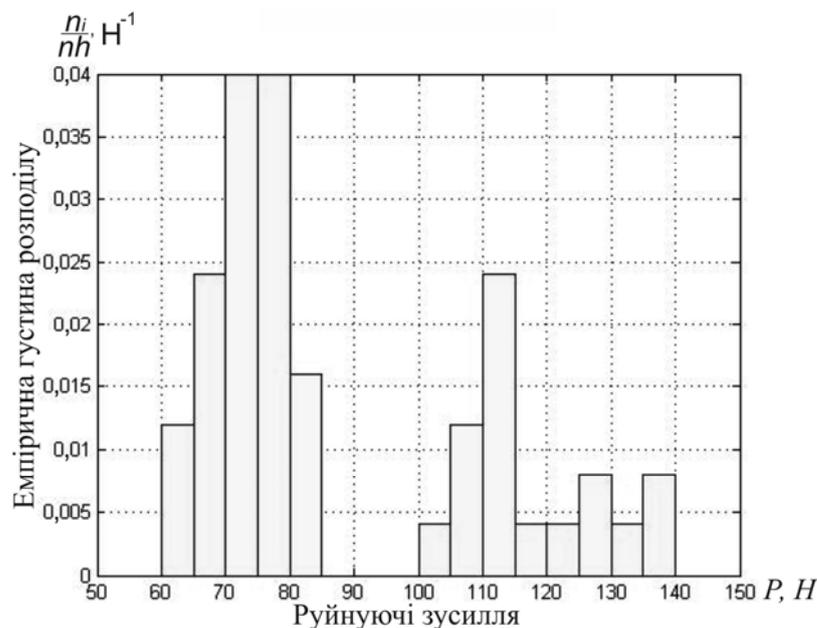


Рис. 4. Розподіл руйнуючих зусиль кераміки резисторів ОМЛТ-0,125

Згідно розробленого методу обробки сумішей розподілу, представлена двомодальна гістограма

апроксимується лінійною комбінацією Гаусових функцій ГР з ваговими коефіцієнтами  $\rho_i$  виду

$$f(x, M_i, S_i, \rho_i) = \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-M_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad N=2, \quad (4)$$

де  $M_i$  і  $\sigma_i$  - математичне сподівання і середнє квадратичне відхилення  $i$ -ї підвибірки, кожна із яких формується під впливом своїх домінуючих причин,  $\rho_i$  - імовірність попадання в  $i$ -у підвибірку,  $\sum_{i=1}^N \rho_i = 1$ ,  $0 \leq \rho_i \leq 1$ ,  $x$  - випадкова величина, у нашому випадку співпадає із  $P$ .

Для подальшої обробки результатів експерименту, перш за все, необхідно визначити невідомі параметри, застосувавши, наприклад, інтерполяцію на деякій точковій множині, згідно з якою невідомі параметри необхідно шукати з умови збігу значень функції (4) у деяких точках (наприклад вершинах і западинах) зі значеннями апроксимуючої функції, графік якої плавною кривою огинає побудовану гістограму. Ясно, що для однозначного визначення  $3N$  невідомих параметрів кількість точок в множині повинна бути не менше, ніж  $3N-1$  (оскільки коефіцієнти  $\rho_i$  завжди пов'язані рівнянням  $\sum_{i=1}^N \rho_i = 1$ ).

Таким чином, для знаходження невідомих  $M_i$ ,  $\sigma_i$  і  $\rho_i$  необхідно скласти і розв'язати систему рівнянь виду

$$\begin{cases} F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, M_i, \sigma_i, \rho_i) dx = \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{S_i \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x_j - M_i)^2}{2S_i^2}\right) dx, \\ j = 1, 2, \dots, 3N-1, \quad \sum_{i=1}^N \rho_i = 1. \end{cases}, \quad (5)$$

де  $M_i$ ,  $\sigma_i$ ,  $\rho_i$  - постійні, але невідомі параметри розподілу  $i$ -ї підвибірки і її ваговий коефіцієнт. Для визначення параметрів шуканого двомодального закону розподілу вибираємо вузли інтерполяції, які разом із значеннями функції в них приведені в таблиці 2. В результаті розв'язку системи (5) при  $N=2$  отримані параметри наступного закону густини розподілу суміші, графіки якого і складових суміші наведені на рис. 5:

$$f(x) = \frac{0,66}{6,6\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-74)^2}{2 \cdot 6,6^2}\right) + \frac{0,34}{5,7\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-114)^2}{2 \cdot 5,7^2}\right) \quad (6)$$

Таблиця 2

Вузли інтерполяції і значення функції

$x_i$	66	74	84	114	124
$f(x_i)$	0,018	0,04	0,012	0,024	0,004

Для подальшої обробки розглянемо підвибірку резисторів, руйнуючі зусилля яких підпорядковуються нормальному закону розподілу з параметрами  $M_1=74\text{Н}$ ,  $S_1=6,6\text{Н}$ , тобто найменш міцних резисторів, тоді можлива помилка для всієї вибірки піде в запас міцності.

Нехай імовірність того, що вказані зусилля лежать на симетричній відносно  $M_1$  ділянці довжиною  $2\delta$  дорівнює  $\gamma=0,995$ , тобто  $P\{|P_{pyi} - M_1| < \delta\} = \gamma$ . Тоді відношення  $\delta/S_1$  є аргументом функції Лапласа, що дорівнює  $\gamma/2$  [50]. За таблицею знаходимо  $\gamma/2=2,8$ , звідки  $\delta=6,6 \cdot 2,8=18,48$  Н. Це означає, що з імовірністю 0,995 за граничне значення руйнуючого навантаження можна прийняти наступне  $P_{cp}=74-18,48=55,52\text{Н}$ .

Аналогічно були отримані значення навантажень, що руйнують кераміку при стискуванні, і відповідні характеристики компаунда, а також обчислені значення граничних напружень в матеріалах (таблиця 3).

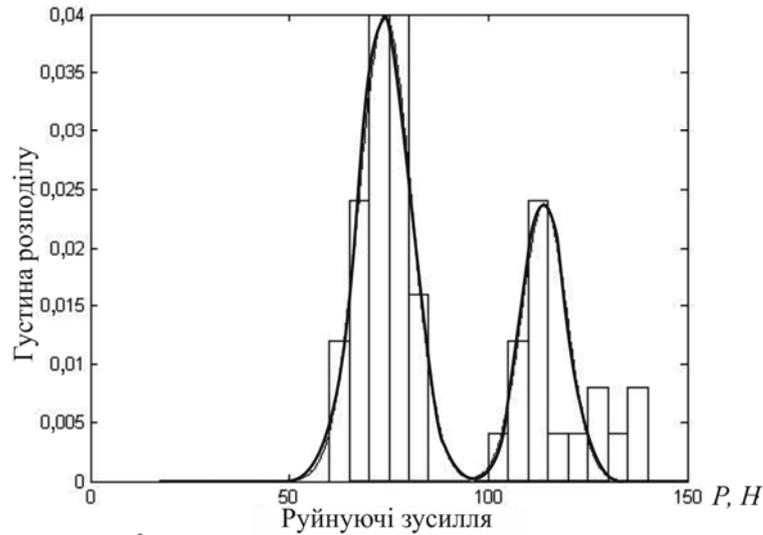


Рис. 5. Графік шуканої сумісної густини розподілу

Таблиця 3

## Граничні напруження в досліджуваних матеріалах

Тип резистора або компаунда	Граничні напруження	
	На розтяг	На стиск
	Напруження, МПа	Напруження, МПа
Резистор ОМЛТ-0,125	68,72	500
Компаунд ЭЗК-25	108,00	110

Далі розв'язувалась задача оптимізації допусків на значення фізико-механічних характеристик матеріалів і геометричних розмірів конструкції резистор-компаунд.

Як показано в (1), для забезпечення працездатності конструкції резистора, герметизованого компаундом, необхідне виконання умов міцності в матеріалах резистора і компаунда. Враховуючи той факт, що компаунд і кераміка при низьких температурах ведуть себе як крихкі матеріали, за першою теорією міцності для внутрішнього і зовнішнього циліндрів умови міцності запишуться відповідно у вигляді

$$\sigma_{екв1} = \sigma_{max1} = \frac{P_{lk} (R_1^2 + R_2^2)}{R_2^2 - R_1^2} \leq [\sigma_1], \quad \sigma_{екв2} = \sigma_{max2} = \frac{P_{lk} (R_2^2 + R_3^2)}{R_3^2 - R_2^2} \leq [\sigma_2], \quad (7)$$

де  $P_{lk}$  - контактний тиск з (2),  $\sigma_{max1}$ ,  $\sigma_{max2}$  - максимальні напруження в матеріалах внутрішнього і зовнішнього циліндрів відповідно,  $[\sigma_1]$ ,  $[\sigma_2]$  - допустимі значення напружень для кераміки і компаунду відповідно.

Допустимі напруження  $[\sigma_1]$ ,  $[\sigma_2]$  для кераміки і компаунду відповідно знаходяться, виходячи із отриманих експериментально граничних напружень  $\sigma_g$  (таблиця 3) з врахуванням коефіцієнта запасу міцності  $n = 2$

$$[\sigma_1] = \sigma_{g1}/n, \quad [\sigma_2] = \sigma_{g2}/n. \quad (8)$$

Виходячи із (7) і (8), обмеження на вихідні характеристики конструкції мають вигляд

$$\begin{cases} \sigma_{екв1} \leq 34,36, \\ \sigma_{екв2} \leq 54. \end{cases} \quad (9)$$

Крім того із ТУ, можна записати обмеження на первинні фактори моделі у вигляді системи нерівностей

$$\begin{aligned} 4 \cdot 10^{-6} &\leq \alpha_1 \leq 8 \cdot 10^{-6}, \\ 35 \cdot 10^{-6} &\leq \alpha_2 \leq 45 \cdot 10^{-6}, \\ 0,25 &\leq \mu_1 \leq 0,35, \\ 0,31 &\leq \mu_2 \leq 0,35, \\ 1 \cdot 10^5 &\leq E_1 \leq 1,5 \cdot 10^5, \\ 0,05 \cdot 10^5 &\leq E_2 \leq 0,15 \cdot 10^5, \end{aligned} \quad (10)$$

$$0,19 \cdot 10^{-3} \leq R_1 \leq 0,21 \cdot 10^{-3},$$

$$0,74 \cdot 10^{-3} \leq R_2 \leq 0,76 \cdot 10^{-3},$$

$$1,1 \cdot 10^{-3} \leq R_3 \leq 2 \cdot 10^{-3}.$$

Далі був проведений наступний чисельний експеримент. Шляхом перебору великої кількості ( $10^5$ ) значень  $\alpha_1, \alpha_2, \mu_1, \mu_2, E_1, E_2, R_1, R_2, R_3$  в інтервалах (10), в результаті підстановки (2) у (7) були одержані розрахункові значення максимальних експлуатаційних напружень  $\sigma_{екс1}$  для кераміки резисторів. На рис. 6 (а) представлені нормалізовані гістограми розподілу максимальних експлуатаційних напружень і допустимих напружень для кераміки резисторів. Очевидно, що обмеження (10) не гарантують міцність конструкції резистор-компаунд, тобто допуски на первинні параметри, задані у ТУ, не обґрунтовані.

Одним із методів призначення допусків може бути перебір достатньо великої кількості значень  $\alpha_1, \alpha_2, \mu_1, \mu_2, E_1, E_2, R_1, R_2, R_3$  в інтервалах (10) і відбір лише такої множини їх значень, яка б гарантувала, що криві розподілу максимальних експлуатаційних і допустимих напружень не перетнуться. На рис. 6 (б) представлений розподіл експлуатаційних напружень, що не перевищують допустимі. Аналогічно можна побудувати гістограми розподілу напружень і для компаунда.

Такий спосіб оптимізації допусків був реалізований за допомогою системи комп'ютерної математики MATLAB. Програма перебирає з певним кроком значення кожного із первинних параметрів, взяті із (10), за формулами (2) і (7) розраховуються максимальні експлуатаційні напруження, і якщо вони не перевищують допустимі (9), формується масив даних векторів цих вхідних параметрів.

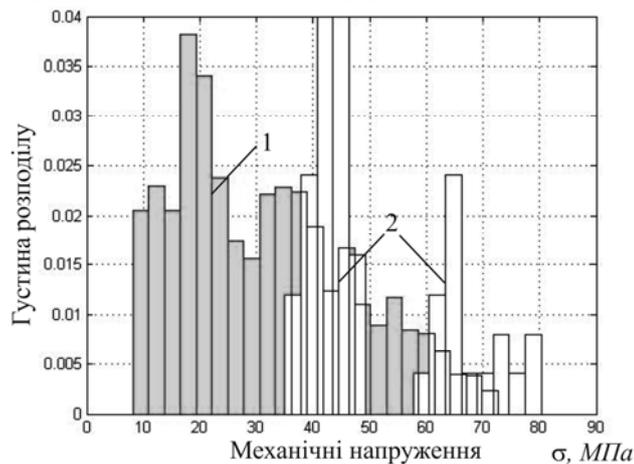


Рис. 6. Розподіл максимальних експлуатаційних (1) і допустимих (2) напружень для кераміки резисторів, що гарантує виконання (3.17)

Більш загальною задачею призначення обґрунтованих допусків на фізико-механічні характеристики матеріалів резистора і компаунда і геометричні розміри досліджуваної конструкції може бути сформульована наступним чином. При заданих номінальних значеннях первинних факторів (3) визначити такі їх допустимі відхилення  $\delta_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 9$  від номінальних значень, щоб у отриманому паралелепіпеді

$$x_{i0} - \delta_i/2 \leq x_{i0} \leq x_{i0} + \delta_i/2, \quad i = 1, 2, \dots, 9 \quad (11)$$

було забезпечено виконання умов (7).

Розв'язок задачі у наведеній постановці означає вписування в криволінійну область, задану нерівностями (7), паралелепіпеду. Але таких паралелепіпедів може бути вписано нескінченно багато. Для вибору конкретного паралелепіпеду

необхідно накласти додаткову умову, для чого пропонується ввести критерій оптимальності або економічного, або виробничого, або будь-якого іншого змісту. Призначення критерію оптимальності дозволяє звести задачу визначення допусків до задачі оптимізації вибраної цільової функції при обмеженнях (7).

Оскільки виходячи з міркувань економії допуски на всі параметри бажано максимально розширити, то розглянута оптимізаційна задача є багатокритеріальною (векторною), а множина оптимальних значень допусків може бути знайдена мінімізацією цільових функцій типу

$$\min(-\delta_i), \quad i = \overline{1, 9}. \quad (12)$$

Добитись одночасної максимізації всіх допусків таким чином, щоб виконувались умови (7), в принципі неможливо. Одним із шляхів розв'язку є зведення даної багатокритеріальної задачі до однокритеріальної (скаляризація), для чого були використані лінійна згортка критеріїв виду

$$F_i = \max_{\{c_i\}_{i=1}^9} \left( \sum_{i=1}^9 c_i \delta_i \right) \text{ і згортка Гермейєра [4] } \tilde{F}_2 = \min_i (c_i \delta_i), \text{ де } c_i \geq 0, \sum_{i=1}^9 c_i = 1 - \text{нормовані додатні числа,}$$

що визначаються із виробничих або економічних міркувань. Отже, задача зводиться до визначення таких значень  $\delta_i$ ,  $i = \overline{1, 9}$ , за яких досягається максимум однієї із цільових функцій  $\tilde{F}_1$ ,  $\tilde{F}_2$  за умови виконання обмежень (7) при перепаді температури від  $+70^\circ\text{C}$  до  $-60^\circ\text{C}$ .

Перевірка виконання цих обмежень на кожному кроці оптимізаційного процесу відбувалась у вершинах побудованих паралелепіпедів, оскільки частинні похідні еквівалентних напружень по кожному із первинних факторів зберігають знаки.

Для конструкції резистора типу ОМЛТ-0,125, герметизованого компаундом ЭЗК-25, було проведено визначення допусків на фізико-механічні характеристики матеріалів резистора і компаунда, а також геометричні розміри конструкції, номінальні значення яких наведені в таблиці 1. Причому обмеження на

первинні фактори і вихідні характеристики конструкції задавались системою нерівностей (10).

Отримані в результаті максимізації цільових функцій  $\tilde{F}_1$  і  $\tilde{F}_2$  значення допусків дозволили визначити такі значення фізико-механічних характеристик матеріалів компаунда і резистора, а також геометричних розмірів конструкції, при яких виконуються умови міцності резистора і компаунда. Ці значення первинних факторів, отримані при різних наборах значень коефіцієнтів  $c_i$ , наведені в таблиці 4. Причому, в одному випадку значення  $c_i$  були встановлені експертним шляхом, а в іншому – всі  $c_i$  приймалися рівними  $1/9$  для дослідження того випадку, коли всі частинні критерії рівнозначні. Оскільки в обох методах оптимізації отримані близькі результати, можна зробити висновок про правомірність застосування скаляризації для розв'язку задачі векторної оптимізації (12).

Таким чином були визначені допуски на фізико-механічні характеристики матеріалів і геометричні розміри вісесиметричної конструкції резистор-компаунд, які гарантують міцність елементів конструкції.

Таблиця 4

Первинні фактори	Критерій оптимальності $\max_{\{c_i\}_{i=1}^9} \left( \sum_{i=1}^9 c_i \delta_i \right)$				Критерій оптимальності $\tilde{F}_2 = \min_i (c_i \delta_i) \rightarrow \max$			
	$c_i = 1/9$ $i = 1, 2, \dots, 9$		$c_1 = c_2 = 0,17$ ; $c_3 = c_4 = 0,04$ ; $c_5 = c_6 = 0,08$ ; $c_7 = c_8 = c_9 = 0,14$		$c_i = 1/9$ $i = 1, 2, \dots, 9$		$c_1 = c_2 = 0,17$ ; $c_3 = c_4 = 0,04$ ; $c_5 = c_6 = 0,08$ ; $c_7 = c_8 = c_9 = 0,14$	
	Границя множини значень				Границя множини значень			
	Нижня	Верхня	Нижня	Верхня	Нижня	Верхня	Нижня	Верхня
$\alpha_{10} \cdot 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>	5,5	6,5	5,5	6,5	5,5	6,5	5,5	6,5
$\alpha_{20} \cdot 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>	38	42	38	42	38,7	41,3	38,3	41,7
$\mu_{10}$	0,290	0,294	0,290	0,294	0,290	0,294	0,290	0,294
$\mu_{20}$	0,315	0,345	0,315	0,345	0,322	0,338	0,321	0,339
$E_{10} \cdot 10^5$ , МПа	1,22	1,40	1,22	1,40	1,22	1,40	1,22	1,40
$E_{20} \cdot 10^5$ , МПа	0,090	0,110	0,098	0,102	0,095	0,105	0,096	0,104
$R_{10} \cdot 10^{-3}$ , м	0,190	0,210	0,190	0,210	0,191	0,209	1,191	0,209
$R_{20} \cdot 10^{-3}$ , м	0,740	0,760	0,740	0,760	0,743	0,757	0,742	0,758
$R_{30} \cdot 10^{-3}$ , м	1,380	1,720	1,100	2,000	1,115	1,985	1,115	1,985

Розроблені методи оптимізації допусків дозволяють вказати обґрунтовані допуски на первинні параметри моделі. На практиці це означає, що ідентифікувавши фізико-механічні характеристики партій резисторів і компаундів, необхідно відібрати такі з них, фізико-механічні характеристики яких знаходяться у паралелепіпеді (11). Таким чином можна гарантовано забезпечити міцність конструкції герметизований елемент-компаунд.

Для оптимізації допусків на первинні фактори моделі перспективним також видається застосування інтервальних глобальних методів оптимізації.

Але постає питання, що робити з рештою партій, фізико-механічні характеристики яких знаходяться поза паралелепіпедом (11), тобто не увійшли у встановлені допуски? З метою підвищення економічної ефективності можна рекомендувати селективне складання вузлів, суть якого у наступному. Для зменшення витрат рекомендується вибирати партії матеріалів так, щоб гістограми розподілу максимальних експлуатаційних напружень і допустимих напружень не перетинались, але були як найближче одна до одної. Оскільки кожна конкретна модель дає власні розрахункові експлуатаційні напруження, то за ними можна підібрати відповідну до моделі партію матеріалів.

Проведені дослідження міцнісних властивостей конструкції резистор-компаунд у складі ММ дозволили запропонувати підприємству-виготовлювачу наступні конструкторсько-технологічні шляхи забезпечення працездатності.

Організація вхідного контролю з метою підбору із працездатних пар, що є у наявності, на основі отриманих у таблиці 4 умов. При цьому контроль відповідних характеристик проводиться за їх імовірнісними вибірковими оцінками, отриманими при обробці методом статистичної обробки багатомодальних законів розподілу [3].

У випадку неможливості або недоцільності введення вхідного контролю або відсутності працездатних пар був запропонований конструктивний захист резисторів від дії компаунда за допомогою термоусадкових трубок (ДМГТ.975.016.ТУ). Ефективність застосування вказаних трубок, які одягаються на резистори, пояснюється наступними обставинами. По-перше, наявність вільного простору між резистором і трубкою, допускає більш вільну деформацію резистора, чим обумовлюється зниження величин напружень в кераміці. По-друге, використання трубки приводить до усунення адгезійних зв'язків між резистором і компаундом, що викликає зменшення напружень в конструкції, що розглядається.

Для перевірки об'єктивності захисту резисторів термоусадочними трубками був проведений наступний експеримент. Резистори типу ОМЛТ-0,125, що були взяті з однієї партії після підготовки їх до монтажу, препарувались тензодатчиками типу МПБ-1. На частину таких резисторів до їх монтажу на плати одягались термоусадочні трубки. Далі мікромодулі зі всіма препаративними резисторами, частина з яких була захищена вказаним чином, герметизувались компаундом ЭЗК-25. Під час полімеризації компаунда і при проведенні термоударів проводилась реєстрація показів тензорезисторів.

Після статистичної обробки результатів дослідження було встановлено, що амплітудні значення деформацій резисторів, захищених трубками, майже вдвічі менше, ніж в серійних, що свідчить про ефективність запропонованих заходів.

Наведені вище конструкторсько-технологічні заходи були впроваджені на ВО «Новатор».

### Висновки

Розроблена математична модель взаємодії резистора з компаундом у складі ММ і виявлені первинні фактори, що впливають на величину виникаючих в матеріалах напружень.

Розроблений метод пробних параметрів для ідентифікації фізико-механічних характеристик компаунда. Ідентифіковані фізико-механічні характеристики компаунда ЭЗК-25 увійшли в розроблену математичну модель як її уточнені параметри.

За допомогою розробленого методу статистичної обробки даних, які не підкоряються унімодальним законам розподілу ймовірностей, визначено обґрунтовані значення допустимих напружень в кераміці і компаунді.

Розв'язана задача оптимізації допусків на фізико-механічні характеристики матеріалів і геометричні розміри конструкції резистор-компаунд, які гарантують міцність елементів конструкції.

Запропоновані конструкторсько-технологічні шляхи забезпечення міцності конструкції резистор-компаунд, впроваджені на ВО «Новатор».

### Література

1. Ройзман В. П., Ковтун І.І., Петрашук С.А. Розрахунок напружень в системі компаунд - електронний елемент при термоударах // Вісник Технологічного університету Поділля. Хмельницький. -2002. -№1. - С. 189 - 195.

2. Ройзман В. П., Ковтун І.І., Петрашук С.А. Ідентифікація фізико-механічних характеристик полімерних матеріалів //Вісник Технологічного університету Поділля. Хмельницький. - 2002. – №.4 - Ч.1. - С.18-25.

3. Горошко А.В. Методи обробки емпіричних даних, що підпорядковуються багатомодальним законам розподілу / А.В. Горошко, В.П. Ройзман // Вісник Хмельницького національного університету. - 2013. №4. -С. 195-201.

### References

1. Royzman V. P., Kovtun I.I., Petrashchuk S.A. Rozrakhunok napruzhen' v systemi kompaund -elektronnyy element pry termoudarakh // Visnyk Tekhnolohichnoho universytetu Podillya. Khmel'nytsky. -2002. -№1. - S. 189 - 195.

2. Royzman V. P., Kovtun I.I., Petrashchuk S.A. Identyfikatsiya fiziko-mekhanichnykh kharakterystyk polimernykh materialiv //Visnyk Tekhnolohichnoho universytetu Podillya. Khmel'nytsky. - 2002. – №.4 - Ch.1. - S.18-25.

3. Goroshko A.V. Metody obrobky empirychnykh danykh, shcho pidporядkovuyut'sya bahatomodal'nym zakonam rozpodilu / A.V. Goroshko, V.P. Royzman // Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. -2013. №4. -S. 195-201.

Рецензія/Peer review : 19.11.2015 р.

Надрукована/Printed :13.12.2015 р.

Є.О. ЗАЙЦЕВ  
Інститут електродинаміки НАН України  
В.Є. СИДОРЧУК, І.В. СИДОРЧУК  
Київський національний торговельно-економічний університет  
А.М. ШПИЛЬКА  
Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ ПРИ ОБРОБЦІ МОНІТОРИНГОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ШЛІФУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

*В статті розглянуто метод виділення з часового ряду періодичної складової вібраційного процесу. Представлено експериментальний прототип системи вимірювання вібрацій для промислового шліфувального обладнання. Наведено результати експериментальних досліджень запропонованого методу виключення періодичних складових із основного часового ряду вібраційного процесу.*

**Ключові слова:** моніторинг, вібродіагностика, тригонометрична інтерполяція, метод найменших квадратів, періодична компонента, вібрації, процес шліфування.

E.O. ZAITSEV  
Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine  
V.E. SYDORCHUK, I.V. SYDORCHUK  
Kyiv National University of Trade and Economics  
A.N. SHPILKA  
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

## USING THE METHOD OF LEAST SQUARES FOR ALLOCATION PERIODIC COMPONENT OF THE DIAGNOSTIC INFORMATION

**Annotation:** In paper presented experimental prototype vibration measurement systems for industrial grinding equipment. For system designed method of time series of periodic vibration component process is considered. There are presented the results of experimental studies of the proposed method to exclude the periodic components of the basic time series of vibration process.

**Keywords:** monitoring, vibration, trigonometric interpolation, least squares method, periodic component, vibrations, grinding treatment

### Вступ

Промислове застосування синтетичних алмазів та інших надтвердих матеріалів стало важливим фактором розвитку машинобудування, підвищення продуктивності праці та поліпшення якості продукції, що випускається. Створення інструментів із синтетичних алмазів відкрило широкі перспективи розвитку металообробного виробництва, тому що з'явилася можливість ефективно обробки надтвердих і надміцних матеріалів. В особливій мірі це відноситься до операцій шліфування, на яких остаточно формуються параметри якості та точності обробки. Застосування алмазних кругів при обробці важкооброблюваних матеріалів обумовлене унікальними фізичними, механічними, термічними, електричними і хімічними властивостями алмазних зерен, таких твердість, жорсткість та зносостійкість, різальна здатність, однорідність і щільність структури, міцність алмазних зерен. Малий коефіцієнт теплового розширення, висока теплопровідність і низький коефіцієнт тертя [1] створюють передумови для виконання ефективно абразивно-алмазної обробки важкооброблюваних матеріалів. Проблемі ефективного використання алмазних кругів на операціях шліфування приділяється значна увага, однак розроблені процеси алмазного шліфування застосовні в основному при чистовому шліфуванні та доведенні, тобто при зніманні відносно невеликих припусків. Використання їх в умовах попереднього шліфування, тобто при зніманні значних припусків, як правило, економічно недоцільно, що пов'язано з відносно низькою продуктивністю обробки та високим зношуванням круга [2].

### Аналіз досліджень та публікацій

На сучасному етапі алмазно-абразивна обробка характеризується пошуком шляхів підвищення продуктивності і економічної рентабельності процесу, якості і точності оброблюваних деталей. Одним із факторів, що в значній мірі визначає ефективність процесу шліфування, є його вібраційна стабільність. Питання підвищення вібраційної стабільності на сьогоднішній день особливо важливі в зв'язку з поширенням використання гнучких автоматизованих виробництв. В інструментальному виробництві розвивається нова тенденція – розробка автоматизованого роботехнічного обладнання, яке по своїм характеристикам і функціональним можливостям буде відповідати сучасним потребам у наукомісткій техніці [3].

Стабільність процесу обробки визначається постійністю вихідних показників шліфування деталей за період всього часу роботи обладнання. При цьому, важливим резервом підвищення стабільності якості обробки є покращення експлуатаційних характеристик обладнання, які визначаються необхідною жорсткістю, демпфуючою здатністю і вібростійкістю [4, 5, 6]. Розробка сучасних методів аналізу моніторингової інформації, отриманої під час виконання операцій шліфування, дозволяє визначити стан



Вирішення отриманої системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів  $c_0, \dots, c_m$  проводиться за допомогою методу МНК. В результаті, на основі знайдених коефіцієнтів  $c_0, \dots, c_m$ , виникає можливість побудувати апроксимуючу криву, тобто знайти періодичні складові вібраційного процесу.

#### Експериментальні дослідження

Теоретичні положення запропонованого методу були перевірені при аналізі діагностичної інформації, отриманої при вимірюванні вібрації системи алмазного шліфування твердого сплаву ВК8. Параметри механічних коливань знімалися за допомогою спеціального модуля (рис. 1), що являє собою горизонтальну консольну пластину, на якій закріплена каретка із оброблюваним зразком. На вільному кінці пластини розміщений аналоговий датчик Холу, що фіксує зміну напруженості магнітного поля при зміні положення пластини відносно магнітної плити шліфувального верстату і, таким чином, надає інформацію про параметри механічних коливань системи в процесі шліфувальної обробки.



Рис. 1. Модуль для визначення параметрів механічних коливань в процесі шліфування

При проведенні досліджень параметри механічних коливань були синхронізовані з частотою обертання алмазного круга. Реалізація синхронізації здійснювалась шляхом розміщення магніту на шківі пасової передачі верстату та встановлення біля нього цифрового датчика Холу, як показано на рис. 2. При кожному повному оберті круга датчик генерував прямокутний імпульс. На рис. 3 приведено осцилограми механічних коливань та імпульсів синхронізації з частотою обертання круга.

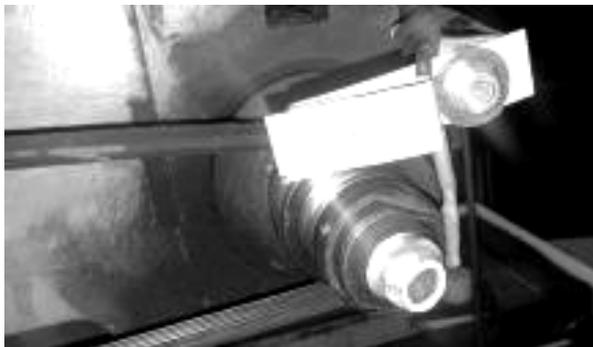


Рис. 2. Модуль синхронізації з частотою обертання алмазного круга

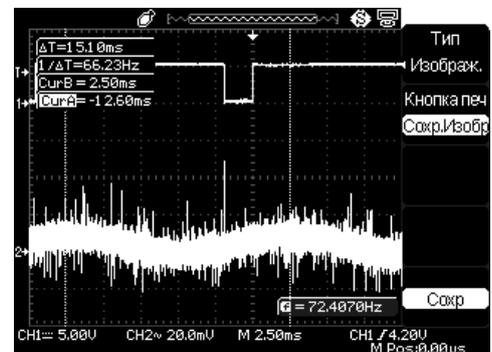


Рис. 3. Осцилограма параметрів механічних коливань, суміщеними з частотою обертання круга

На рис. 4.а зазображено графік вібраційного процесу, що має місце при роботі шліфувального круга під час холостого ходу. На рис. 4.б зображена виділена періодична складова, а на рис. 4.в – шумова складова вібраційного процесу. На рис. 4.г приведено розподіл шумової складової за амплітудою формою, яка найбільш подібна до розподілу Гауса. Дослідження проводилися при попередньому виключенні трендових складових.

Аналогічні результати були досягнуті при дослідженні вібрації алмазного круга в момент притискання до деталі (рис. 5) та під час шліфування деталі (рис.6).

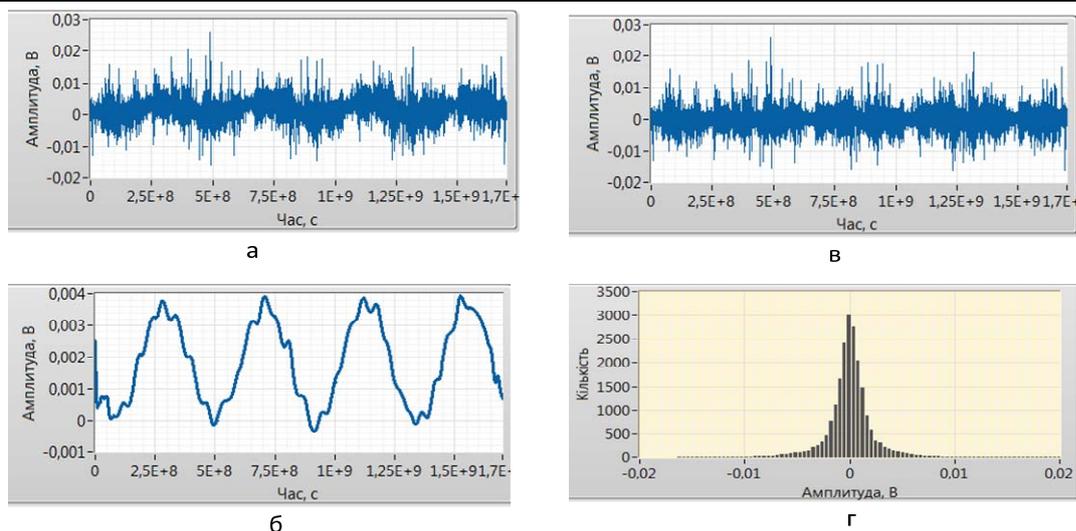


Рис. 4. Графіки механічних коливань, що виникають при холостому ході круга

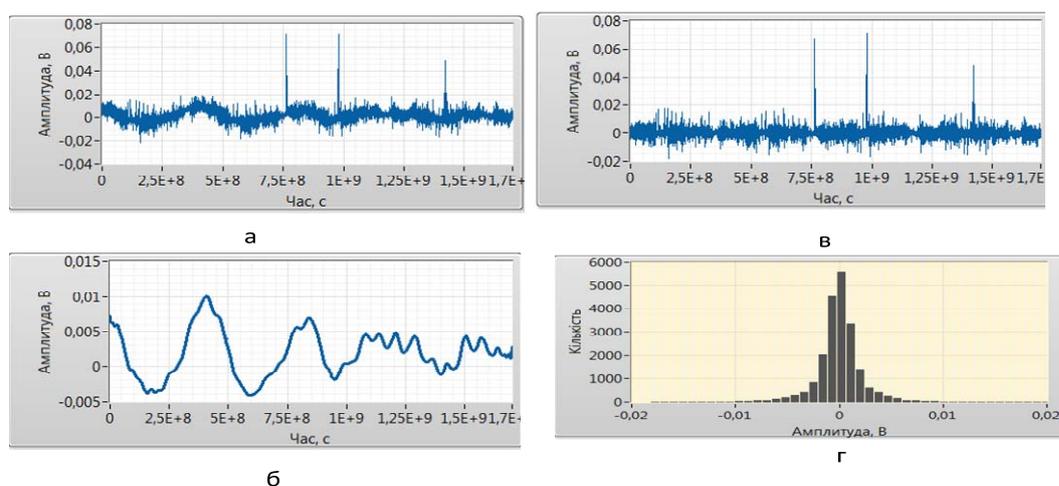


Рис. 5. Механічні коливання, що виникають під час притискання кула до заготовки з BK8

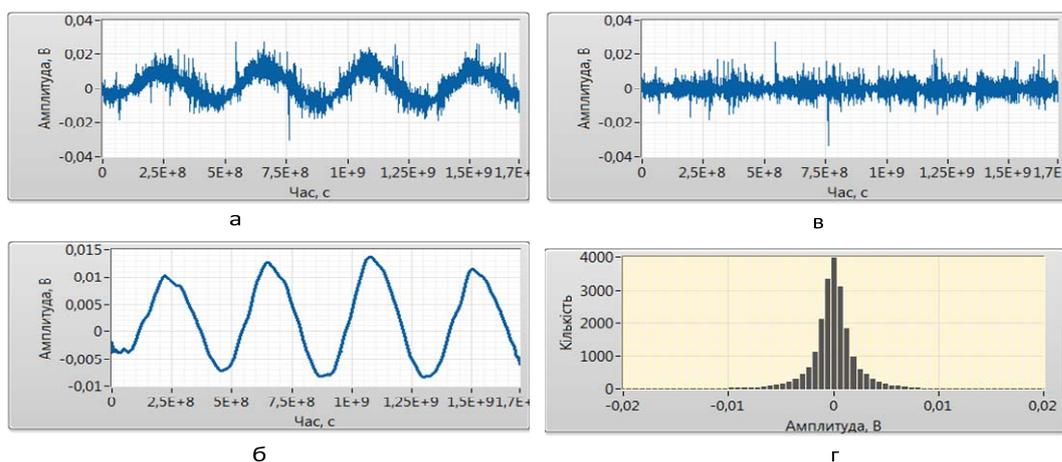


Рис. 6. Механічні коливання, що виникають в процесі шліфування заготовки з BK8

### Висновок

Вирішення проблеми обґрунтування шляхів підвищення продуктивності та якості обробки має важливе і актуальне значення. Застосування МНК до досліджуваних вібрацій алмазного шліфування дозволяє виділити періодичні складові процесу, що пропорційні періодичності процесів, спричинених роботою системи ВПД при алмазному шліфуванні твердих сплавів. Проведене розділення дозволяє провести більш детальний аналіз періодичних та шумових складових вібраційного процесу механічної обробки. Такий аналіз, проведений безпосередньо під час робочого процесу, дає можливість своєчасного управління шліфуванням для підвищення його якості або припинення процесу в разі неможливості досягнення заданих параметрів.

## Література

1. Иванова Т.Н. Повышение эффективности торцового алмазного шлифования пластин из труднообрабатываемых сталей на основе изменения температурно-силовых условий процесса: дис. д.т.н.: 05.02.08 / Т.Н. Иванова. – Чайковский, 2014. – 418 с.
2. Новіков Ф.В. Високопродуктивне алмазне шліфування: монографія / Ф. В. Новіков. – Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. – 412 с. (Укр. мов.)
3. Новиков Н.В. Проблемы производственной и социальной восприимчивости высоких технологий в области инструментального производства // Инструментальный світ. – 2003. – №4. – С. 4-6.
4. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1978. – 199 с.
5. Братан С.М. Анализ влияния колебаний, передаваемых через фундамент станка, на качество процесса шлифования / С.М. Братан, Е.А. Владецкая // Вестник НТУ "ХПИ". - 2008. – №35. – с. 13-22.
6. Алейникова, М.А. Повышение эффективности процесса плоского шлифования на основе анализа влияния динамических факторов / М.А. Алейникова, Н.Н. Агаркова, О.А. Кривенцова // Инструмент и технологии. – 2008. – №25. – Вып. 1. – с. 44-48.
7. Зайцев Є.О., Лісогор М.В. Застосування метода Берга для аналізу вібросигналів, отриманих за допомогою лазерних сенсорів // Електроніка і зв'язь: науко-технічний журнал. – 2014. – Т. 19, № 6(83). – С. 66-72.
8. Srbulov M. Ground Vibration Engineering: Simplified Analyses with Case Studies and Examples/Netherlands.: Springer – 2010. – 233 p.
9. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения // Пер. с англ. – М.: Мир. – 1990. – 584 с.
10. Ю.В. Попов О выделении периодической компоненты из временного ряда показателя количества катастроф // Проблемы безопасности полетов – 2008.

## References

1. Ivanova T.N. Povyshenie ehffektivnosti tortsovogo almaznogo shlifovaniya plastin iz trudnoobrabatyvaemyh staley na osnove izmeneniya temperaturno-silovykh usloviy protsessu: dis. d.t.n.: 05.02.08 / T.N. Ivanova. – CHaykovskiy, 2014. – 418 s.
2. Novikov F.V. Visokoproduktivne almazne shlifuvannya: monografiya / F. V. Novikov. – H. : Vid. HNEU im. S. Kuznetsya, 2014. – 412 s. (Ukr. mov.)
3. Novikov N.V. Problemy proizvodstvennoy i sotsial'noy vospriimchivosti vysokih tekhnologiy v oblasti instrumental'nogo proizvodstva // Instrumental'niy svit. – 2003. – №4. – S. 4-6.
4. Kedrov S.S. Kolebaniya metallorazhushhih stankov. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 199 s.
5. Bratan S.M. Analiz vliyaniya kolebaniy, peredavaemykh cherez fundament stanka, na kachestvo protsessu shlifovaniya / S.M. Bratan, E.A. Vladetskaya // Vestnik NTU "HPI". - 2008. – №35. – с. 13-22.
6. Aleynikova, M.A. Povyshenie ehffektivnosti protsessu ploskogo shlifovaniya na osnove analiza vliyaniya dinamicheskikh faktorov / M.A. Aleynikova, N.N. Agarkova, O.A. Kriventsova // Instrument i tekhnologii. – 2008. – №25. – Vyp. 1. – с. 44-48.
7. Zaitsev C.O., Lisogor M.V. Zastosuvannya metoda Berga dlya analizu vibrosignaliv, otrimanih za dopomogoyu lazernih sensoriv // Elektronika i svyaz': nauchno-tekhnicheskij zhurnal. – 2014. – T. 19, № 6(83). – S. 66-72.
8. Srbulov M. Ground Vibration Engineering: Simplified Analyses with Case Studies and Examples/Netherlands.: Springer – 2010. – 233 p.
9. Marpl S. L. Tsifrovoy spektral'nyy analiz i ego prilozheniya // Per. s angl. – M.: Mir. – 1990. – 584 s.
10. YU.V. Popov O vydelenii periodicheskoy komponenty iz vremennogo ryada pokazatelya kolichestva katastrof // Problemy bezopasnosti poletov – 2008.

Рецензія/Peer review : 4.11.2015 р.

Надрукована/Printed :13.12.2015 р.

**ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ ТРАЄКТОРІЇ ПОЛЬОТУ ПОВІТРЯНОГО СУДНА**

*Досліджено процес вибору оптимальної траєкторії польоту повітряного судна. Розроблено аналогію знаходження оптимальної траєкторії руху повітряного судна уникаючи конфліктів і оптимізуючи функцію вартості, яка залежить від тривалості поїздки, а також індекс вартості, виходячи з функції навігації та генетичного алгоритму. При знаходженні оптимальної траєкторії польоту одним із пріоритетних рішень виділено пошук приблизної геодезичної траєкторії. Наводиться механізм вибору оптимальної траєкторії польоту за участю декількох повітряних суден.*

**Ключові слова.** траєкторія польоту, повітряний простір, повітряне судно, конфлікт, генетичний алгоритм, функція навігації, обмеження вартості, часові обмеження, зона польоту.

VICTOR PALAMARCHUK, OLEKSI POLIUKHOVYCH, ALEKSANDER LUPPO  
National aviation University, Kiev, Ukraine

**SELECTION OF OPTIMAL TRAJECTORY OF FLIGHT OF AIRCRAFT**

*The process of selecting the optimal flight path of the aircraft. Designed analogy of finding the optimal trajectory of the aircraft to avoid conflicts and optimize the cost function which depends on the duration of the trip, as well as the index value on the basis of the navigation function and genetic algorithm. In finding the optimal trajectory of a priority to allocate search approximate geodesic path. It provides a mechanism of choosing the optimal flight path involving several aircraft.*

**Keywords** flight path, air, aircraft, conflict, genetic algorithm, the navigation function, limit value, time constraints, the flight zone.

**Постановка проблеми**

За останнє десятиліття було запропоновано кілька методів[1,2] щодо знаходження оптимального рішення, здатного забезпечити проходження шляху повітряним судном на найбільш вигідних умовах. Метою цих методів виступає механізм уникнення конфліктів між групою суден. На сьогоднішній день, розрізняють два основні класи методів, які призводять до вирішення проблеми знаходження оптимальної траєкторії руху повітряного судна, це генетичні алгоритми і функція навігації, кожен із зазначених методів призводить лише до часткового вирішення проблеми. Перший – полягає у генеруванні безлічі траєкторій з використанням трьох основних операторів: відбору, мутації і кросовера. Генетичні алгоритми генерації траєкторії руху досягаються асимптотично оптимальним рішенням, проте у рамках часу даний алгоритм не гарантує абсолютно оптимального підходу. Другий метод, заснований на навігаційних функціях, полягає у електростатичному моделюванні. Головною проблемою даного методу виступає те, що електрон, який має негативний заряд, є предметом електричного поля, і привертає позитивний заряд (ціль), що відштовхнувся від негативних зарядів (перешкод).

Таким чином, літак (віртуальний електрон) являє собою момент у 3D просторі і якщо математична функція потенційних полів може бути побудована відносно різнозаряджених електронів, то віртуальна сила спрямована на ціль (оптимальну траєкторію), може бути обчислена. Це призводить до знаходження траєкторії руху, яка з'єднує точку вильоту з пунктом призначення, при цьому уникаючи перешкод.

Навігаційні функції вже довели свою ефективність у плануванні руху з гарантованим униканням зіткнень, проте вони не беруть до уваги економічну складову, обмеження швидкості, часові обмеження.

Дана робота, заснована на аналогії знаходження оптимальної траєкторії руху повітряного судна уникаючи конфліктів і оптимізуючи функцію вартості, яка залежить від тривалості поїздки, а також індекс вартості (коефіцієнт, що враховує витрату палива).

**Актуальність дослідження**

Основною метою вибору оптимальної траєкторії польоту повітряного судна є забезпечення структурованої мобільності, тобто знаходження найкращого шляху переміщення повітряного судна з одного місця в інше [3].

У загальному випадку можливо кілька шляхів руху для досягнення місця призначення, і, отже, кілька послідовних шляхів переміщення. Як правило, весь шлях складається з набору точок, які зумовлені на відомих або частково відомих картах місцевості. Повітряне судно має специфічне ставлення, яке у поєднанні з його місцем розташування представляється як  $P(x, y, z, 0, \psi)$ , де  $(x, y, z)$  – це розташування судна,  $(0, \psi)$  – це горизонтальні і вертикальні кути відповідно.

На сьогоднішній день, вибір оптимальної траєкторії польоту повітряного судна, є актуальним завданням, спрямованим на скорочення часу в дорозі, на зниження ймовірності зіткнень повітряних суден, а також зменшення економічної складової.

Грунтуючись на вищевикладеному, вибір оптимальної траєкторії польоту повітряного судна є актуальним в умовах сьогодення.

### Ступінь дослідження в науковій літературі

Процес планування маршруту повітряних суден часто зустрічається у літературі як зарубіжній, так і вітчизняній [1-4]. Це пов'язане з великою кількістю досліджень планування маршруту безпілотних літальних апаратів та наземних роботів. Тим не менш, при роботі з літальними апаратами, до площини руху необхідно додати висоту у розрахунках маневрів в космосі. А, що стосовно, повітряних суден тут, не мало важним аспектом, постає питання економічної складової та механізму скорочення часу витраченого на проходження шляху.

Існує лише кілька посилань на роботи, виконані у трьох вимірах для планування маршруту повітряних суден, до їх числа варто віднести [3,5,6]. Досить широко проведено аналіз безконфліктних траєкторій польоту повітряних кораблів у роботі Д.В. Васильєва [7].

Розв'язання конфліктних ситуацій між повітряними кораблями маневруванням курсом польоту детально розглядалося у роботі В. П. Харченко, Д. В. Васильєва [8].

Аналогічний підхід можна побачити в роботах зарубіжних вчених, таких як Р. К. Menon, G. D. Sweriduk, V. Sridhar [9], а також А. Bicchi, L. Pallottino [10].

Проте, питання вибору оптимальної траєкторії польоту і досі залишається розробленим не повною мірою, що спонукало до проведення досліджень у даному напрямку.

### Мета дослідження

У рамках даної роботи варто розкрити процес вибору оптимальної траєкторії польоту повітряного судна. Розробити механізм знаходження оптимальної траєкторії руху повітряного судна уникаючи конфліктів і оптимізуючи функцію вартості, яка залежить від тривалості поїздки, а також індекс вартості. Навести механізм вибору оптимальної траєкторії польоту за участю декількох повітряних суден.

### Виклад основного матеріалу

Планування траєкторії польоту повітряного судна характеризується однаковими вихідними параметрами початкової та кінцевої точках. Фактично є три просторові координати  $(x, y, z)$  та три кутові орієнтації – кути Ейлера [11] (крену, тангажу, ролання).

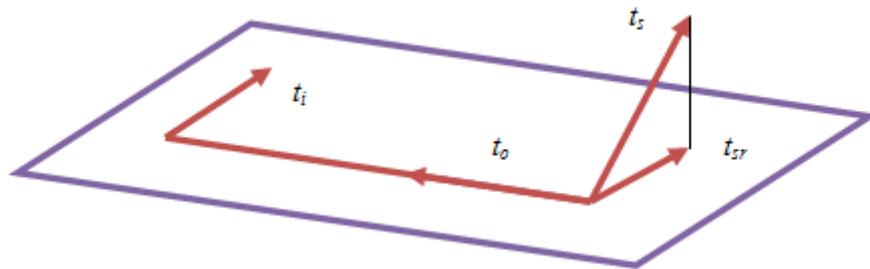
Тривимірний шлях польоту  $r(q)$  можна отримати за допомогою рішення наступного рівняння:

$$P_s(x_s, y_s, z_s, \theta_s, \psi_s) \xrightarrow{r(q)} P_f(x_f, y_f, z_f, \theta_f, \psi_f) \quad (1)$$

$$|k(t)| < k_{\max}, |\tau(t)| < \tau_{\max}$$

де  $\tau(t)$  – кривизна,  $\chi(t)$  – кручення траєкторії

Одна з класичних траєкторій, що використовується для маневру повітряного судна від однієї висоти до іншої є перетином круглої спіралі, яка проектується на площину  $X - Y$  у вигляді кола. Важливою властивістю цієї кривої являється те, що і кривизна, і кручення постійні. На початку проектування варто визначити початковий маневр дуги, що торкається дотичного вектору  $t_s$  в площині, щоб отримати  $t_{sr}$  (Рисунок 1). Це буде гарантувати, що цей вектор знаходиться в одній площині з  $t_0$  та  $t_i$



Розробка автора на основі літературних джерел 4,5  
Рис. 1. Умови планування траєкторії польоту

Початкова траєкторія буде складатися з комбінованої кривизни траєкторії щодо вектору бінормалі, з подальшим креном, щоб вибудувати нормальні і бінормалі вектори, для формування остаточної траєкторії польоту. Однак даний підхід є загальним та вимагає доопрацювання, тому для усунення початкового обертання у конфігурації траєкторій в одній площині, варто провести геометричний аналіз.

Варто наголосити, що  $t_3$ ,  $n_s$  і  $t_f$ ,  $n_f$  належать в одній і тій же траєкторії літака, тобто, бінормалі вектору в обох точках нормальні до площини траєкторії і, таким чином, паралельні один одному. Проте, для багатьох точок у 3D просторі, це правило не вірно. Також, варто враховувати, що знак маневру може бути визначений з урахуванням осевої лінії між двома положеннями. З точки зору кожної позиції, позитивне чи негативне обертання від дотичного вектора до центрального вектора буде визначено знаком кривизни для

кожного маневру. На початку маневру та на його фініші літак проходить паралельно дотичного вектора  $t_s$ .

Початкові умови:

$$\begin{bmatrix} t_{ms} & n_{ms} & b_{ms} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_s & n_s & b_s \end{bmatrix} R_s \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} t_{mf} & n_{mf} & b_{mf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_f & n_f & b_f \end{bmatrix} R_f$$

де

$$R_s = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi_s) & -\sin(\varphi_s) \\ 0 & \sin(\varphi_s) & \cos(\varphi_s) \end{pmatrix}$$

$$R_f = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi_f) & -\sin(\varphi_f) \\ 0 & \sin(\varphi_f) & \cos(\varphi_f) \end{pmatrix} \quad (3)$$

і де  $\varphi_s$  та  $\varphi_f$  кути повороту для початкових і фінішних маневрів літака.

Радіус-вектори може бути визначено як

$$r_s = \begin{bmatrix} t_{ms} & n_{ms} & b_{ms} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \mp 1/k_s \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

і, аналогічно,

$$r_f = \begin{bmatrix} t_{mf} & n_{mf} & b_{mf} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \mp 1/k_f \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Базисні вектори пов'язані

$$\begin{bmatrix} t_f & n_f & b_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_s & n_s & b_s \end{bmatrix} R \quad (6)$$

де  $R$  є матрицею обертання на яку потрібно змінити вісь набору від початку до фінішу.

Таким чином, маємо:

$$R = (t_f \quad n_f \quad b_f) \cdot (t_s \quad n_s \quad b_s) \quad (7)$$

що дає:

$$R = \begin{pmatrix} t_f \cdot t_s & t_f \cdot n_s & t_f \cdot b_s \\ n_f \cdot t_s & n_f \cdot n_s & n_f \cdot b_s \\ b_f \cdot t_s & b_f \cdot n_s & b_f \cdot b_s \end{pmatrix} \quad (8)$$

З'єднувальні вектори утворюють ортогональний набір векторів. З'єднувальні вектори нормальні до вектора змінного струму, лежать паралельно. Кожен окремий вектор лежить у відповідній площині маневру. Внутрішній з'єднувальний вектор змінного струму є загальним для обох маневрів повітряного судна. Таким чином, можна записати у вигляді

$$a_c = a \begin{bmatrix} t_{ms} & n_{mf} & b_{mf} \end{bmatrix} a_f$$

$$= a \begin{bmatrix} t_{mf} & n_{mf} & b_{mf} \end{bmatrix} a_f \quad (9)$$

де

$$a_s = \begin{pmatrix} a_{ts} \\ a_{ns} \\ a_{bs} \end{pmatrix} \quad \text{та} \quad a_f = \begin{pmatrix} a_{tf} \\ a_{nf} \\ a_{bf} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Вектори для двох площин маневру можуть бути пов'язані з

$$\begin{bmatrix} t_f & n_f & b_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_s & n_s & b_s \end{bmatrix} R$$

$$\begin{bmatrix} t_{mf} & n_{mf} & b_{mf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_f & n_f & b_f \end{bmatrix} R_f$$

$$\begin{bmatrix} t_{ms} & n_{ms} & b_{ms} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_s & n_s & s \end{bmatrix} R_s \quad (11)$$

через

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} t_{ms} & n_{ms} & b_{ms} \end{bmatrix} R'_s &= \begin{bmatrix} t_s & n_s & b_s \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} t_{mf} & n_{mf} & b_{mf} \end{bmatrix} R'_f &= \begin{bmatrix} t_f & n_f & b_f \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} t_s & n_s & b_s \end{bmatrix} R \\
 &= \begin{bmatrix} t_{ms} & n_{ms} & b_{ms} \end{bmatrix} R'_s R
 \end{aligned} \tag{12}$$

та

$$\begin{bmatrix} t_{mf} & n_{mf} & b_{mf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{ms} & n_{ms} & b_{ms} \end{bmatrix} R' R R_f \tag{13}$$

Це означає, що

$$\begin{aligned}
 a_s &= R'_s R R_f a_f \\
 a_f &= R' R R_s a_s
 \end{aligned} \tag{14}$$

Радіус-вектори RS і RF також можуть бути описані в осях початку маневру, як

$$\begin{aligned}
 r_s &= \begin{bmatrix} t_{ms} & n_{ms} & b_{ms} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \mp 1/k_s \\ 0 \end{pmatrix} \\
 r_f &= \begin{bmatrix} t_{ms} & n_{ms} & b_{ms} \end{bmatrix} R' R R_f \begin{pmatrix} 0 \\ \mp 1/k_s \\ 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{15}$$

Тепер, вектори, лежать у зоні маневрів повітряних суден і нормальні до сполучного вектора змінного струму. Вони також можуть бути визначені в осях початку маневру, у вигляді

$$\begin{aligned}
 a_s &= \frac{\mp 1}{k_s} \begin{bmatrix} t_{ms} & n_{ms} & b_{ms} \end{bmatrix} \beta_s \\
 a_f &= \frac{\mp 1}{k_f} \begin{bmatrix} t_{mf} & n_{mf} & b_{mf} \end{bmatrix} \beta_f \\
 &= \frac{\mp 1}{k_f} \begin{bmatrix} t_{ms} & n_{ms} & b_{ms} \end{bmatrix} R' R R_f \beta_s
 \end{aligned} \tag{16}$$

щоб гарантувати, що вектори з'єднання лежать у площині маневру і нормальні до внутрішнього вектору відбувається підключення до мережі, як

$$\begin{aligned}
 \beta_s &= \frac{1}{b_s} \begin{pmatrix} -\alpha_{ns} \\ \alpha_{ts} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \beta_f = \frac{1}{b_f} \begin{pmatrix} -\alpha_{nf} \\ \alpha_{tf} \\ 0 \end{pmatrix} \\
 b_s &= \sqrt{\alpha_{ns}^2 + \alpha_{ts}^2}, \quad b_f = \sqrt{\alpha_{nf}^2 + \alpha_{tf}^2} \\
 \beta_s \alpha_s &= 0, \quad \beta_f \alpha_f = 0
 \end{aligned} \tag{17}$$

Положення фінішної точки щодо стартової позиції вимірюється у початковій площині осей, як

$$\begin{aligned}
 p_s - p_s &= \begin{bmatrix} t_s & n_s & b_s \end{bmatrix} p \\
 &= \begin{bmatrix} t_{ms} & n_{ms} & b_{ms} \end{bmatrix} R'_s p \\
 p_m &= R'_s p \\
 p &= \begin{pmatrix} p_t \\ p_n \\ p_b \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{18}$$

Потім, векторна сума для вектора позиції задається

$$\begin{aligned}
 p_m &= -r_s + a_s + a_c - a_f + r_f \\
 p_m + r_s - r_f &= a_s + a_c - a_f
 \end{aligned} \tag{19}$$

Підставляючи вектори, отримуємо

$$R'_s p + r_s - R' R R'_f r_f = a_s + a_c - R' R R'_f a_f \quad (20)$$

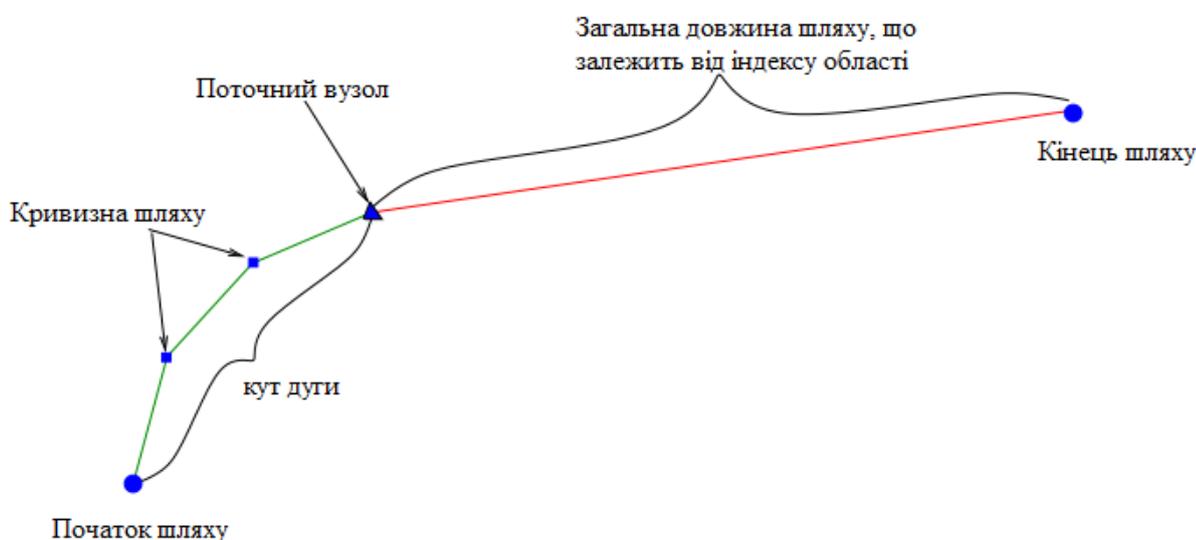
Перепишуючи це у початковій площині осей дає

$$p + R_s r_s - R R'_f r_f = R_s a_s + R_s a_c - R R'_f a_f \quad (21)$$

Тоді загальну довжину шляху повітряного судна знаходимо за формулою:

$$h_{\text{шляху}} = h_i + h_s + h_t + h_f = \frac{a_i}{k_s} + \frac{a_s}{k_s} + a + \frac{a_f}{k_f} \quad (22)$$

де  $h$  – це довжина шляху,  
 $s, t, i, f$  – початок шляху, кінець шляху, загальна довжина відповідно,  
 $i$  – сегмент,  
 $\alpha$  – кут дуги,  
 $k$  – кривизна.



Розробка автора на основі літературних джерел 2,4  
 Рис. 2. Схема планування шляху повітряного судна

Всі вузли, які знаходяться у полі шляху мають однакову глибину  $i$ , в цілому, являють собою дерево хвильового фронту. Таким чином, при знаходженні оптимальної траєкторії одним із пріоритетних рішень є пошук приблизної геодезичної траєкторії, тобто вибирається вузол, який генерується в рамках дерева. Недоліком такого підходу є те, що вузли, які далекі від оптимального, можуть дати велику кількість обчислення. Для того, щоб уникнути їх, необхідно вибрати вузол, який знаходиться між пов'язаними вузлами траєкторії на одному рівні дерева пошуку.

Однак, запропонована методика працює при моделюванні траєкторії польоту без урахування можливості знаходження в одному повітряному просторі декількох судів. При знаходженні оптимальної траєкторії польоту за участю декількох повітряних суден, алгоритм керування послідовністю буде дещо змінений, вибір літака буде заснований на правилі пріоритету, якщо таке присутнє, в іншому випадку, працюватиме правило послідовності. Тобто траєкторія польоту першого повітряного судна буде розрахована з урахуванням того, що немає інших. Другого – з урахуванням траєкторії першого, третього – з урахуванням перших двох в якості обмежень і т.д. При цьому показник заломлення враховує захист зони польоту інших літаків.

Індекс функції простору задається як:

$$\begin{aligned} \left\| \overrightarrow{X_i - \vec{Y}} \right\| &:= a_i \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{якщо } a_i \leq R \quad n(\vec{Y}) := N \quad N \gg 1 \\ \text{якщо } a_i \geq R \quad n(\vec{Y}) := 1 \end{array} \right. & \quad (23) \end{aligned}$$

де  $R$  – стандартна відстань розділення.

Індекс символізує бар'єрну функцію, що розмежує дві постійні зони (вільна зона та зона польоту).

**Висновок.** В статті розглядається процес вибору оптимальної траєкторії польоту повітряних суден на основі двох основних підходів: функції навігації та генетичного алгоритму. Виходячи з того, що

описувані підходи у своєму складі не враховують економічну складову, обмеження швидкості та часові обмеження, пропонується проектування оптимальної траєкторії польоту уникаючи конфліктів і оптимізуючи функцію вартості, яка залежить від тривалості поїздки, а також коефіцієнт, що враховує витрату палива.

При цьому пошук приблизної геодезичної траєкторії працює при моделюванні траєкторії польоту без урахування можливості знаходження в одному повітряному просторі декількох судів, тому, у рамках роботи, пропонується рішення, яке засновано на правилі пріоритету або правилі послідовності.

Таким чином, запропонований варіант вибору оптимальної траєкторії польоту повітряного судна спрямований на скорочення часу в дорозі, на зниження ймовірності зіткнень повітряних суден, а також зменшенням економічної складової, що є немаловажним в умовах сьогодення.

### Література

1. Васильєв Д. В. Модель керованого руху повітряних кораблів для системи розв'язання конфліктних ситуацій / Д. В. Васильєв // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: збірник наукових праць. – Житомир: ЖВІ НАУ, 2012. – Спецвипуск 2. – С. 76-80.
2. Hu. J., Prandini M., Sastry S. Optimal Maneuver for Multiple Aircraft Conflict Resolution: A Braid Point of View, Proc. of the 39th IEEE conf. on decision and control, Sydney, 2000, vol. 4, pp. 4164–4169.
3. Goodchild C., Vilaplana M.A., Elefante S. Cooperative Optimal Airborne Assurance in Free Flight Airspace, 3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Napoli, 13–16 June, 2000.
4. G. Roussos, G. Chaloulos, K. Kyriakopoulos and J. Lygeros. Control of multiple non-holonomic air vehicles under wind uncertainty using model predictive control and decentralized navigation function, IEEE Conference on Decision and Control, December, 2008.
5. User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.9. – EUROCONTROL, 2011. – 107 p.
6. Баженов С. Г., Кулида Е. Л., Лебедев В. Г. Формирование бесконфликтных траекторий предпосадочного маневрирования с учетом ограничений на маневренные возможности самолета // Проблемы управления. 2012. – № 2. – С. 70-75.
7. Васильєв Д. В. Багатокритеріальний аналіз безконфліктних траєкторій польоту повітряних кораблів / Д.В. Васильєв // Наукоємні технології: збірник наукових праць. – Київ: НАУ, 2014. –21(1). – С. 37-40.
8. Харченко В. П. Розв'язання конфліктних ситуацій між повітряними кораблями маневруванням курсом польоту / В. П. Харченко, Д. В. Васильєв // Вісник НАУ. – 2011. – № 2 (47). – С. 15-20.
9. Menon P. K. Optimal Strategies for Free Flight Air Traffic Conflict Resolution, Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1999, no.22(2), pp. 202-211.
10. Bicchi A. On Optimal Cooperative Conflict Resolution for Air Traffic Management Systems, IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, 2000, vol. 1, no. 4, pp. 221-232.
11. Єжов С. М., Макарець М. В., Романенко О. В. Класична механіка. – К.: ВПЦ "Київський університет", 2008. – 480 с.

### References

1. Vasylyev D. V. Model kеровanoho rukhu povitrianykh korabliv dlia systemy rozv'iazannia konfliktnykh, Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zbirnyk naukovykh prats, Zhytomyr: ZhVI NAU, 2012, Spetsvypusk 2, pp.76-80.
2. Hu. J., Prandini M., Sastry S. Optimal Maneuver for Multiple Aircraft Conflict Resolution: A Braid Point of View, Proc. of the 39th IEEE conf. on decision and control, Sydney,2000, vol. 4, pp. 4164–4169.
3. Goodchild C., Vilaplana M. A., Elefante S. Cooperative Optimal Airborne Assurance in Free Flight Airspace, 3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Napoli, 13–16 June, 2000.
4. G. Roussos, G. Chaloulos, K. Kyriakopoulos and J. Lygeros. Control of multiple non-holonomic air vehicles under wind uncertainty using model predictive control and decentralized navigation function, IEEE Conference on Decision and Control, December, 2008.
5. User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.9., EUROCONTROL, 2011, 107 p.
6. Bazhenov S. G., Kulida E. L., Lebedev V. G. Formirovanie beskonfliktnykh traektorij predposadochnogo manevrirovaniya s uchetom ogranichenij na manevrennye vozmozhnosti samoleta, Problemy upravlenija. 2012. – no. 2, pp. 70-75.
7. Vasylyev D. V. Bahatokryterialnyi analiz bezkonfliktnykh traektorii polotu povitrianykh korabliv, Naukoiemni tekhnolohii: zbirnyk naukovykh prats, Kyiv: NAU, 2014, no. 21(1), pp. 37-40.
8. Kharchenko V. P. Rozv'iazannia konfliktnykh situatsii mizh povitrianyu korabliamy manevruvanniam kursom polotu, Visnyk NAU, 2011, no.2 (47), pp.15-20.
9. Menon P. K. Optimal Strategies for Free Flight Air Traffic Conflict Resolution, Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1999, no. 22(2), pp. 202-211.
10. Bicchi A. On Optimal Cooperative Conflict Resolution for Air Traffic Management Systems, IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, 2000, vol. 1, no. 4, pp. 221-232.
11. Yezhov S. M., Makarets M. V., Romanenko O. V. Kласична mekhanika, K.: VPTs "Kyivskiy universytet", 2008, 480 p.

Рецензія/Peer review : 2.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 13.12.2015 р.

**STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF NI+AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ZN COATINGS  
PRODUCED BY THE LOW PRESSURE COLD SPRAY TECHNOLOGY**

*Low Pressure Cold Spraying (LPCS) is a thermal spraying technique for applying high-density coatings on almost any surface. The main features of the LPCS is that Air is used for the powder materials acceleration through a DeLaval Nozzle with a maximum operation temperature of 630 °C in a pressure range of 5 to 9 atm. The powders used in LPCS are usually metal matrix composite blends using Alumina very often as the Ceramic part of the composition. The aim of this study is to investigate the effect of the stagnation spraying temperature on the coating properties produced with the Dymet 405 Low Pressure Cold Spraying system and a Ni+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Zn powder blend. The coatings are submitted to analyses using a SEM microscope and Metallographic techniques, Micro-Hardness testing and Adhesion-Cohesion measurements.*

*Key words: cold spray technology, Mach number, adhesive-cohesive strength, micro-hardnesses.*

О. КАНАЛЕС, А. ВОЛКОВ, С. Є. МАРКОВИЧ, А. І. ДОЛМАТОВ  
Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ»

**ВИВЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТТЯ NI+AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ZN  
ОТРИМАНОГО ТЕХНОЛОГІЄЮ ХОЛОДНОГО НАПИЛЕННЯ НИЗЬКОГО ТИСКУ**

*Холодне напилення низького тиску (ХННТ) - це технологія для нанесення покриттів з високою щільністю на будь-які поверхні. Основними особливостями ХННТ є те, що повітря для прискорення порошкових матеріалів через сопло Лавала використовується з максимальною робочою температурою 630 °C в діапазоні тисків від 5 до 9 атм. Порошки, використовувани в ХННТ, як правило, металеві матричні композити міші з частим використанням глинозему в якості керамічної складової композиту. Метою даного дослідження є вивчення впливу стагнації температури розпилення на властивості покритті в отриманих на системі холодного напилення низького тиску ДИМЕТ 405 і порошкової суміші Ni + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Zn. Представлений аналіз покриття за допомогою мікроскопа SEM і металографічного методу, тестування мікро-твердості і виміру адгезійно-когезійної міцності.*

*Ключові слова: технологія холодного напилення, число Маха, адгезійно-когезійна міцність, мікро-твердість.*

**1. Introduction**

The cold spraying technique was developed in the Soviet Union in the 80's. Mainly, the process is characterized from other Thermal Spraying coating techniques from the use of much more lower operative pressures and significantly lower process temperatures. The coatings are formed when powder materials are accelerated to supersonic velocities by the use of a convergent-divergent nozzle to consequently be impacted on a substrate; the bonding phenomena has been a controversial point of discussion, but there is an agreement on that bonding is due a high degree of plastic deformation on non melted particles during their impact [1].

The Low Pressure Cold Spraying Technology (LPCS) is characterized for using air as the accelerated fluid with inlet pressures from 5 to 9 atm and a top temperature that reaches the 630 Celsius. The acceleration of the particles through the diverging gas-stream is due the resultant drag force applied to their surfaces; this approach converge in the idea that not only the gas velocity is the responsible for particles acceleration, but the density of the gas as well which is dependent on the Mach number of the accelerated stream [2]. In LPCS a wide range of powder materials (i.e. Cu, Al, Ni, Zn) can be co-sprayed with ceramic particles as Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [3]. The main reasons for using ceramic particles are: to propagate the surface activation while spraying and to clean the nozzle while metallic particles are hammered and better deformed in the process in comparison of spraying them without ceramics; different studies [3-5] have shown that the addition of ceramic particles give results on better coatings adhesion and better density; for this reason it is acceptable to say, that the ceramics addition to the metallic matrix in the LPCS process acts as a reinforcement for the metal matrix composite (MMC) [6].

The aim of this study was to characterize the micro-structure and mechanical properties of Ni+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Zn coatings in order to get more information about their adhesion strength and micro-hardness dependent on their spraying temperature.

**2. State of the art (literature review)**

The characterization of thermal spraying coatings requires tests in order to determine their mechanical properties as: micro-hardness, adhesion strength, corrosion, etc. The major emphasis between the coatings properties in surface science is for the tensile adhesion strength because it is usually a design requirement for most coating materials [7]. The coating properties are generally influenced by the process parameters as Temperature, Pressure, feedstock characteristics, etc. In order to determine the degree of adhesion (bonding strength) of coatings normal to a substrate an Adhesion or Cohesion test is used is performed. The adhesion testing methods are very controversial between the scientific community due the large variance between laboratory to laboratory [7-8]. The main reasons for this variances is attributed to: Bending moments during the effect of normal tensile forces, adhesive penetration into the coatings porosity, usually adhesion values depend on the coatings thickness, residual stresses could be distributed not evenly, machine vibration, difference in loading rates, non uniformity of coating surfaces, etc. Between the available methods for determining the adhesion strength in Thermal Spray coatings the ASTM C 633

standard is one of the most used. Different authors have reported various adhesion strength ranges and behaviors for Low Pressure Cold Sprayed coatings. A. Kuznetsov for example [9], have found a decrease in adhesion strength while incrementing the stagnation temperature of LPCS Al+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Zn coatings. In [10-11] is discussed the adhesion strength as a function of the substrate material. In [10] adhesion strength measurements for coatings created with powders of Ni + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with values of ~14 MPa for the coatings sprayed using air as carrier gas and stainless steel for the substrate and values of ~20 MPa for those coatings applied on Nickel alloy substrates. Hardness measurement of Thermal Sprayed Coatings is considered an easy and well standardized practice for this materials [7]. Other than adhesion strength characterization, hardness measurement is a measurement method that usually gives the same alike results within laboratories. The Vickers standard test is considered a standard micro-hardness measurement standard for thermal sprayed coatings. It is known that the Vickers hardness measurements vary depending on the metallographic preparation of the specimens. In order to get better readings, multiple measures are taken and averaged. As there is not a clear dependence between the coating properties and the low pressure cold spraying process parameters it is important to further develop scientific bases that address this aspect.

### 3. Objective of the research work

The objective of the present research work is to characterize coatings produced with the DYMET 405 Low pressure cold spraying equipment at different process stagnation temperatures (424 °C, 526 °C and 632 °C) for the powder N7-00-14 obtained from the Obnisk Center for Powder Spraying (OCPS) in order to better understand the effect of the process stagnation temperature on the coating properties. For the development of the proposed objective the following tasks were set:

1. N7-00-14 coatings deposition using the DYMET 405 low pressure cold spraying equipment at the stagnation temperatures 424 °C, 526 °C and 632 °C.
2. Metallographic preparation of the produced coatings.
3. Characterization of the produced coatings.

### 4. Experimental Procedures

In this investigation a N7-00-14 (65%wt.%Ni + 10wt.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 25wt.% Zn) commercial powder (Fig. 1) from Obnisk Center for Powder Spraying (OCPS) was sprayed with a DYMET 405 Cold Spraying equipment available at the National Aerospace University of Ukraine. Aluminum 2024 substrates with a diameter of 24.7 mm for Adhesions tests and 50 x 30 mm substrates for metallographic studies were prepared for spraying with sanding paper P360. The SK-20 Nozzle with an Exit Diameter of 4.9 mm was used to accelerate the powder within three different stagnation temperatures - 424 °C, 526 °C and 632 °C. Five different specimens sets were prepared in order to spray them at different stagnation temperatures. The Coatings were characterized using a SELMI REM-106 Scanning Electron Microscope (SEM).

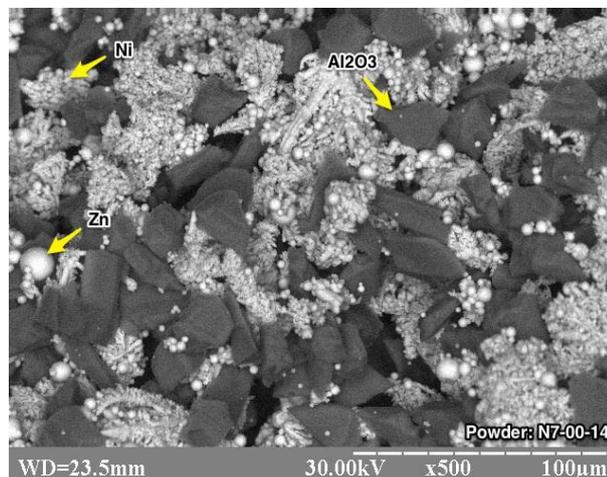


Fig.1. Morphology of powder N7-00-14 Powder in a blend of 65%wt.%Ni+10wt.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+25wt.%Zn provided by OCPS

The ASTM E3-01 for Preparation of Metallographic Specimens was followed for the substrates of this study; the specimens were etched using dilute hydrochloric acid (HCl) in order to better distinguish the borders of the deformed particles. The Deposition Efficiency was measured for each Stagnation Temperature under the standard ISO 17836-2004.

Mechanical testing was performed on the coatings in order to determine their adhesive-cohesive strength and micro-hardnesses. A tensile strength machine was used in order to determine the Adhesive-Cohesive strength of the coatings according to the ASTM 633 Standard; four tests per coating were performed to determine the average adhesive-cohesive strength at every stagnation temperature. Micro-Hardness tests were also performed under the ASTM E92 Standard (Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials).

#### 4.1 Metallographic analysis of Coatings

The LPCS coatings were prepared for metallographic analysis under the ASTM E3-01 standard to consequently be observed in a SEM Microscope. Fig. 2 Shows the SEM images at the 200x Amplification for specimens sprayed at 424 C (a), 526 C (b) and 632 C (c). In the microstructure the black particles are non-deformed Alumina particles that were impregnated into the coating.

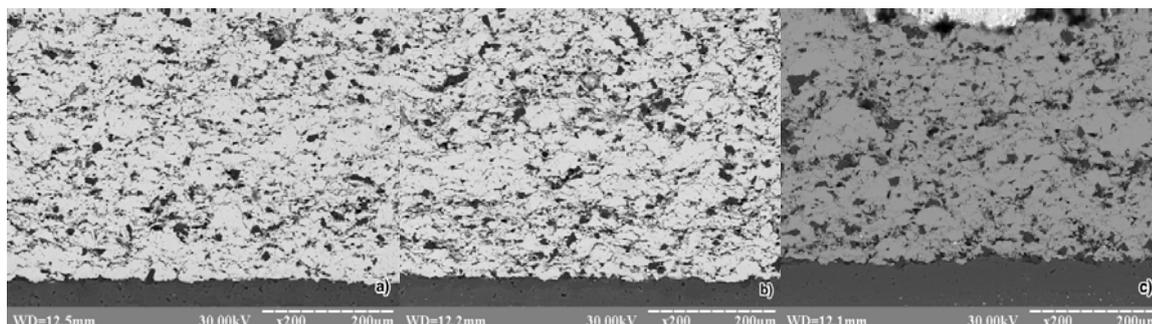


Fig.2. SEM images at the 200x Amplification for specimens sprayed at 424 C (a), 526 C (b) and 632 C (c). In the microstructure the black particles are non-deformed Alumina particles that were impregnated into the coating

The thickness of the N7-00-14 coatings was 200 microns. From visual inspection the coatings to be dense without any noticeable porosity. It is not possible to recognize the powder particle boundaries in the microstructure, for this reason it is etched with dilute hydrochloric acid (HCl). The flattened shaped particles, indicates a high degree of deformation. Despite the high density of the coatings, some open boundaries can be detected near the coating surface and some oxidized boundaries can be spotted within the coating structure. The oxidation layers can be attributed to the electrolytic feedstock powder production method; this is common for dendritic powders which because their morphology, have larger surface area than spherical particles produced by the atomized method. The Air used as operating gas can cause another oxidation source. Black particles within the coatings structure are the  $Al_2O_3$  part of the powder blend.

#### 4.2 Mechanical Properties of Coatings

Mechanical testing was performed on the coatings in order to determine their adhesive-cohesive strength and micro-hardnesses. A tensile strength machine was used in order to determine the Adhesive-Cohesive strength of the coatings according to the ASTM 633 Standard; four tests per coating were performed to determine the average adhesive-cohesive strength at every stagnation temperature. Micro-Hardness tests were also performed under the ASTM E92 Standard (Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials).

##### 4.2.1 Bond Strength

The ASTM C 633 standard for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray coatings studies the adhesion strength for coatings sprayed at different stagnation temperatures. The N7-00-14 powder blend was sprayed at different spraying stagnation temperatures - 424 °C, 526 °C and 632 °C - with a constant stagnation pressure of 0.8 MPa with the DYMET 405 Low Pressure Cold Spraying equipment.

Under the ASTM C 633 specifications 5 testing samples for each stagnation temperature were studied. Epoxy ED-20 was selected for this study and tested for its maximum adhesive strength presenting 22 MPa (SD 3) of adhesive bonding strength. Test samples were prepared for the spraying operation with sanding paper P360. Coatings of ~350µm were evenly applied on the test sample. Tensile specimens were assembled as specified in ASTM C 633 using the Epoxy ED-20, which was cured in 12 hours at ambient temperature.

Tensile strength was applied for each of the specimens with five runs for each stagnation temperature and material configuration. Table 1 shows the results of the adhesion strength study. The results show that the adhesion strength of N7-00-14 are above 22 MPa for all the stagnation temperatures.

Table 1

Results of the adhesion strength study.

Stagnation Temperature	424 °C	536 °C	632 °C
Bond Strength	> 22 MPa   Epoxy	> 22 MPa   Epoxy	> 22 MPa   Epoxy

##### 4.2.2 Micro-Hardness

The micro-hardness for coatings sprayed at different stagnation temperatures is studied under the ASTM E92 Standard (Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials).

The N7-00-14 powder blend was sprayed at different spraying stagnation temperatures - 424 °C, 526 °C and 632 °C - with a constant stagnation pressure of 0.8 MPa with the DYMET 405 Low Pressure Cold Spraying equipment. The Vickers hardness was determined using a load of 50gr. for all the samples. Fig. 3 shows the results for micro-hardness readings.

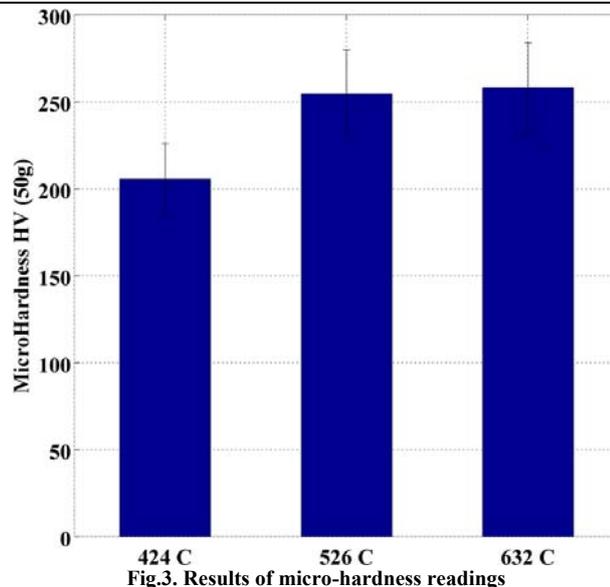


Fig.3. Results of micro-hardness readings

### 5. Results discussion

The results obtained after the characterization of coatings produced with the N7-00-14 Nickel based powder show a clear increase on micro-hardness while increasing the process stagnation temperature. Since the maximal adhesion strength of the epoxy ED-20 used during the coatings adhesion strength characterization has a magnitude of 22MPa (SD 3) a clear effect of the stagnation temperature on the coatings adhesion to the substrate cannot be determined. The metallographic analysis have shown a good coatings density for every studied stagnation temperature. Further research is recommended in order to determine the yield adhesion strength of N7-00-14 coatings.

### 6. Conclusion

In this work, the characterization of Low Pressure Cold Sprayed coatings at several stagnation temperatures was presented. The N7-00-14 nickel based material powder MMC blend was sprayed at different stagnation temperatures - 424 °C, 526 °C and 632 °C - and a constant stagnation pressure of 0.8 MPa using the Dymet 405 Cold Spraying system. The coatings were applied onto Aluminum 2024 substrate specimens. The ASTM E3-01 standard was applied in order to prepare the specimens for metallographic study; the study revealed an increase on strain when the powder material was sprayed at higher stagnation temperatures. The standard ASTM C 633 was used in order to determine the bond strength of coatings sprayed at the different stagnation temperatures; the adhesion strength of the coatings was higher than the adhesion strength of the epoxy while presenting adhesive failure at the epoxy zone in all the cases. The ASTM E92 Standard was applied in order to determine the micro hardness of coatings; N7-00-14 coatings presented an increase in micro hardness when spraying it at higher stagnation temperatures. The increase on micro-hardness when spraying the material at higher stagnation temperatures can be attributed to the work hardening on the particles during deformation after impacting the substrate.

### References

1. Papyrin A, 'Cold Spray Technology', Advanced Materials & Processes, 2001.
2. R.C. Dykhuizen, and M.F. Smith. Gas dynamic principles of cold spray, Journal of Thermal Spray Technology, vol. 7, no. 2, 1998, pp 205–212.
3. Shkodkin, A, Kashirin, A., Klyuev, O. and T. Buzdygar. The Basic Principles of DYMET Technology, Thermal Spray 2006: Building on 100 Years Success, B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.C. Lau, R.S. Lima, and J. Voyer, Ed, May 15-18, 2006 (Seattle, Washington, USA), ASM International, P. 3.
4. Borchers, C. F. Gaertner, T. Stoltenhoff, H. Assadi, and H. Kreye. Microstructural and Macroscopic Properties of Cold Sprayed Copper Coatings, J. Appl. Phys, 2003, 93(12), pp.10064-10070.
5. Maev R.G. and V. Leshchynsky. Air Gas Dynamic Spraying of Powder Mixtures: Theory and Application [Text]/ R.G. Maev // J. Therm. Spray Technol. – 2006, 15(2) . – P. 198-205.
6. Canales, H., Dolmatov, A. and S. Markovich Computational analysis of composite powders impacts to evaluate ceramic coatings in Cold Spraying, Thermal Spray 2011: Proceedings of the International Thermal Spray Conference (DVS-ASM), September 01, 2011, (Hamburg, Germany), pp. 835 – 839.
7. Berndt, C.C. Tensile Adhesion Testing Methodology for Thermally Sprayed Coatings, J. Mater. Eng., vol 12 (no. 2), June 1990, pp.151–158.
8. Koivuluoto, H. and Vuoristo, P. Effect of Powder Type and Composition on Structure and Mechanical Properties of Cu+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coatings Prepared by using Low-Pressure Cold Spray Process, J. Therm. Spray Technol., 2010, 19(5), pp. 1081-1092.

9. Kuznetsov Y.A., Combined Technology of Restoration and Hardening Elements. (in Russian).

10. Koivuluoto, H., Lagerbom, J. and Vuoristo, P. Adhesion of Cold Sprayed Coatings: Effect of Powder, Substrate, and Heat Treatment, Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions, B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.-C. Lau, C.-J. Li, R.S. Lima, and G. Montavon, Ed., May 14-16, 2007 (Beijing, China), ASM International, pp. 31-36

11. S. Guetta, Berger, M.H., Borit, F., Guipont, V., Jeandin, M., Boustie, M. Poitiers, F. Ichikawa, Y. and K. Ogawa. Influence of Particle Velocity on Adhesion of Cold-Sprayed Splats, Thermal Spray 2008: Crossing Borders, E. Lugscheider, Ed., ASM International, Materials Park, OH, 2008.

Рецензія/Peer review : 10.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 19.12.2015 р.

**УДК 621.397**

**Е.В. ОШАРОВСКАЯ, Н.А. ПАТЛАЕНКО, В. И. СОЛОДКА**

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

## **ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СЕТОЧНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ЦИФРОВОГО ПОТОКА**

*В работе рассматривается скорость передачи реальных трехмерных сеточных объектов. Анализируются скорости передачи для двух стандартов дискретизации в разных цифровых потоках. Было показано, как произвести проекцию трехмерного объекта на двумерное пространство. Получены зависимости канальной емкости от скорости передачи цифрового потока сцены из двух объектов для структур дискретизации 4:4:4 и 4:2:2. Найдены аппроксимирующие функции канальной зависимости в виде сплайнов.*

*Ключевые слова. Сеточные объекты, скорость передачи, цифровой поток, трехмерное пространство.*

E.V. OSHAROVSKAYA, N.A. PATLAENKO, V.I. SOLODKA

O.S. Popov's Odessa national academy of telecommunications

## **QUALITY ASSESSMENT THREE-DIMENSIONAL MESH OBJECTS AT DIFFERENT SPEEDS OF DIGITAL STREAMS**

*Abstract - The paper deals with the transmission rate of real three-dimensional mesh objects. We have analyzed the transmission rate for two sampled structures in different digital streams. It was shown how to make a projection of a three-dimensional object on a two-dimensional space. The paper deals with the transmission rate of real three-dimensional meshes. We have analyzed the transmission rate for sampling structures 4: 4: 4 or 4: 2: 2. and bit rate of the studied objects. It was shown how to make a projection of a three-dimensional object on a two-dimensional space. The dependences of channel capacity from a digital stream have been received and approximated by splines for a scene of two objects*

*Keywords: Meshes, the transmission rate, the digital stream, the three-dimensional space.*

### **Постановка задачи**

Для исследования скорости передачи выбранных трехмерных объектов используем две структуры дискретизации 4:2:2 и 4:4:4. Скорость передачи для выбранных структур 4:2:2 (1) и 4:4:4 (2), и при разных параметрах исследуемых объектов, выглядят следующим образом [1, 2]:

$$V_p = R * 2 * W * H * F \quad (1)$$

$$V_p = R * 3 * W * H * F \quad (2)$$

где  $V_p$  – скорость передача данных объекта, бит/с;  
 $W$  и  $H$  – ширина и высота кадра в пикселях;  
 $R$  – разрядность для каждой компоненты, бит;  
 $F$  – кадровая частота, кадров/с.

### **Проецирование трехмерных объектов на двумерный ТВ растр**

Так как мы исследуем трехмерные объекты, то нам необходимо перейти из трехмерного пространства в двумерное. Координаты в двумерном пространстве имеют следующий вид:

$$X_c = x + k_x * z, \quad (3)$$

$$Y_c = y + k_y * z, \quad (4)$$

где  $X_c$  и  $Y_c$  – координаты на плоскости;  
 $x, y, z$  – координаты в трехмерном пространстве;  
 $k_x, k_y$  – коэффициенты проекции глубины, которые берутся по модулю и не превышают значения единицы. Коэффициенты принимаем равными 0,5.

При переходе из трехмерного пространства в двумерное надо учесть тот факт, что используется децимация координат и клиппинг вершин объекта. Это позволяет восстанавливать объект в двумерном пространстве с высокой четкостью [3]. Соответственно, ширину и высоту кадра исследуемого объекта рассчитаем по формулам (5) и (6) следующим образом:

$$W = X_{max} - X_{min}, \quad (5)$$

$$H = Y_{max} - Y_{min}, \quad (6)$$

где  $X_{max}$  и  $Y_{max}$  - максимальное количество элементов разложения в двумерном пространстве по осям  $X$  и  $Y$ .  
 $X_{min}$  и  $Y_{min}$  - минимальное количество элементов разложения в двумерном пространстве по осям  $X$  и  $Y$ .

**Определение скорости цифрового потока**

Для исследования скорости цифрового потока от трехмерного объекта используем прямое и обратное вейвлет-преобразования Daubechies 4-го порядка, задаемся выбранным порогом отношения S/N в 35дБ.

Рассчитаем скорость передачи исследуемых реальных сеточных объектов для выбранных видеостандартов 4:2:2 и 4:4:4.

В трехмерном виде объекты описаны Galleon (рис.1) 2510 вершин и 4698 треугольников и Big\_spider (рис.3) 4670 вершин и 9286 треугольников.

Объект Galleon представлен в трехмерном виде (рис. 1) и в двумерной проекции (рис.2). В двумерном пространстве объект преобразовался с высотой 935 пикселей и шириной 656 пикселей. Начало координат в преобразованной области располагается в центре объекта.

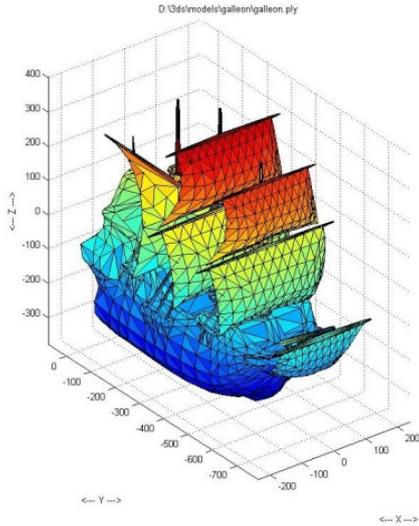


Рис. 1. Объект Galleon

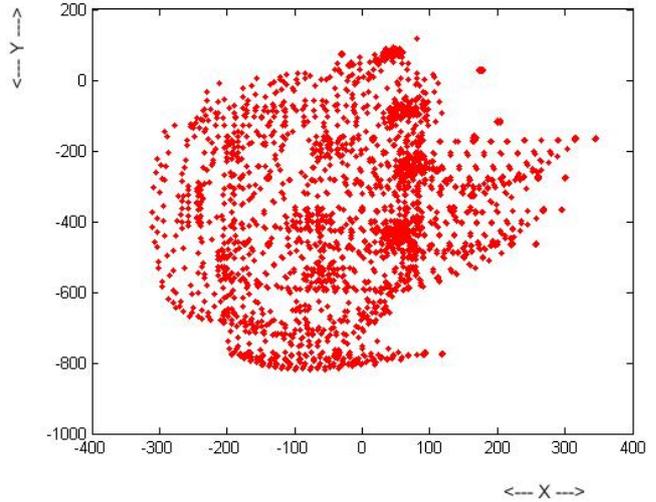


Рис. 2. Объект Galleon в двумерном виде

В таблице 1 приведены результаты расчета скорости передачи данных объекта Galleon для формата дискретизации 4:2:2, для случаев построчной и чересстрочной разверток с учетом клиппинга (удаления невидимых вершин) и децимации, при разной разрядности обрабатываемых данных.

Таблица 1

**Скорость передача данных объекта Galleon для формата 4:2:2**

Разрядность \ Кадров в секунду	25	50
8	3,1 кбит/с	6,2 кбит/с
16	6,6 кбит/с	12,5 кбит/с
32	9,7 кбит/с	18,7 кбит/с
64	12,9 кбит/с	31,3 кбит/с

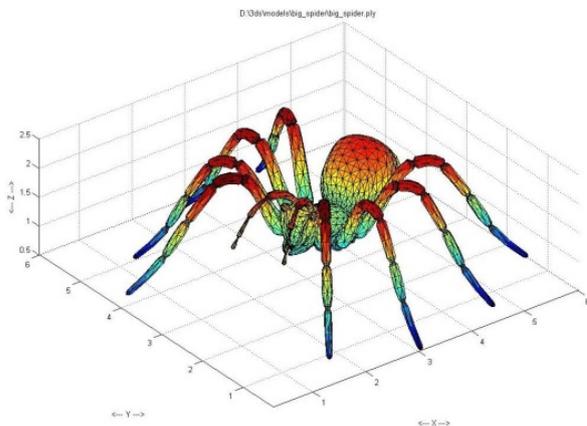


Рис. 3. Объект Big spider

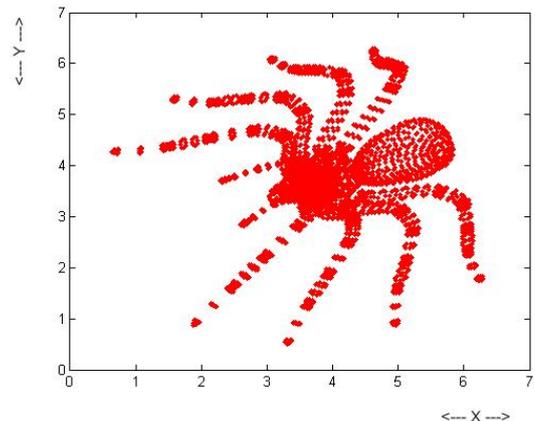


Рис. 4. Объект Big spider в двумерном виде

Объект Big spider в двумерном пространстве спроецировался в двумерную область с высотой и по

ширине по 7 елементов разложения.

Таблица 2

**Расчет скорость передача данных объекта Big spider для формата 4:2:2.**

Кадров в секунду разрядность	25	50
8	1,63 кбит/с	3,27 кбит/с
16	1,84 кбит/с	3,7 кбит/с
32	2,1 кбит/с	4,3 кбит/с
64	2,6 кбит/с	5,2 кбит/с

Аналогично рассчитаем скорость передачи данных исследуемых сеточных трехмерных объектов для видеостандарта формата 4:4:4.

Таблица 3

**Расчет скорость передача данных объекта Galleon, для формата 4:4:4.**

Кадров в секунду разрядность	25	50
8	8,8 Мбит/с	16,6 Мбит/с
16	10,2 Мбит/с	20,4 Мбит/с
32	14,2 Мбит/с	29,2 Мбит/с
64	18,1 Мбит/с	36,2 Мбит/с

Таблица 4

**Расчет скорость передача данных объекта Big spider, для формата 4:4:4.**

Кадров в секунду разрядность	25	50
8	19,5 кбит/с	39,1 кбит/с
16	39,1 кбит/с	78,3 кбит/с
32	78,3 кбит/с	156,6 кбит/с
64	156,6 кбит/с	313,2 кбит/с

Для определения скорости передачи данных трехмерных объектов при отношении  $S/N$  35дБ для эфирного наземного цифрового телевидения второго поколения DVB-T2 [4] нам необходимо знать максимальную скорость передачи данных, соответствующую потоку в 45,5 Мбит/с. [5]. Для цифрового Интернет-телевидения IP – предельную скорость передачи данных можно принять равной 100 Мбит/с.

Общая скорость цифрового потока исследуемых сеточных трехмерных объектов:

$$V_{pgalleon} + V_{pbigspa} = V_{\Sigma} ,$$

где  $V_{pgalleon}, V_{pbigspa}$  - скорость передачи исследуемых трехмерных объектов.

Определяем количество виртуальных каналов, необходимых для передачи сцены из двух объектов через цифровой поток для вещательной системы DVB-T2 (7) и Интернет телевидения IP ТВ (8)

$$\frac{45,5 \text{ Мбит/с}}{V_{\Sigma}} = n_{\text{каналов}} \quad (7)$$

$$\frac{100 \text{ Мбит/с}}{V_{\Sigma}} = n_{\text{каналов}} \quad (8)$$

Следовательно, можем подсчитать количество виртуальных каналов при пропускной способностью 8 Мбит/с, которые войдут в общую скорость цифрового потока исследуемых сеточных трехмерных объектов:

$$\frac{V_{\Sigma}}{8 \text{ Mbit/s}} = n_{\text{каналов}}$$

Таблица 5

**Количество каналов формата 4:2:2 для передачи сцены из двух сеточных трехмерных объектов .**

Кадров в секунду разрядность	$V_{\Sigma}$ для 25	$n_{\text{каналов}}$	$V_{\Sigma}$ для 50	$n_{\text{каналов}}$
8	1,78 кбит/с	0,00021	3,57 кбит/с	0,0004
16	2 кбит/с	0,00025	4 кбит/с	0,0005
32	2,28 кбит/с	0,00028	4,63 кбит/с	0,00058
64	2,8 кбит/с	0,0003	5,56 кбит/с	0,00069

Аппроксимируя полученные зависимости канальной емкости от скорости передачи цифрового

потока объектной сцены формата 4:2:2 получаем сплайны:

$$F(t) = \sum_{i=1}^3 a_i i^{i-1} \quad \text{для 25 кадров в секунду для 2 исследуемых объектов}$$

$$F(t) = \sum_{i=1}^6 a_i i^{i-1} \quad \text{для 50 кадров в секунду для 2 исследуемых объектов.}$$

Таблица 6

**Количество передаваемых каналов сцены из двух сеточных трехмерных объектов для формата 4:4:4.**

разрядность \ Кадров в секунду	$V_{\Sigma}$ для 50	$n_{\text{каналов}}$	$V_{\Sigma}$ для 25	$n_{\text{каналов}}$
8	42,7 кбит/с	0,005	21,3 кбит/с	0,002
16	85,4 кбит/с	0,01	42,7 кбит/с	0,005
32	171 кбит/с	0,02	85,5 кбит/с	0,01
64	342 кбит/с	0,04	171 кбит/с	0,02

Запишем формулы получившихся сплайнов для формата 4:4:4:

$$F(t) = \sum_{i=1}^{172} a_i i^{i-1} \quad \text{для 25 кадров в секунду для 2 исследуемых объектов;}$$

$$F(t) = \sum_{i=1}^{343} a_i i^{i-1} \quad \text{для 50 кадров в секунду для 2 исследуемых объектов.}$$

### Выводы

В данной работе для обработки трехмерных телевизионных объектов, описанных сеткой, используется среда MatLab. В результате анализа получили данные о скорости цифрового потока для двух реальных сеточных объектов, но можно проанализировать большее количество сеточных реальных объектов с заданным порогом отношения сигнал / шум 35 дБ, что позволяет восстанавливать их с высокой четкостью и качеством. Построены аппроксимирующие зависимости канальной емкости от скорости передачи цифрового потока объектной сцены в виде сплайнов.

### Литература

1. Джакония В.Е. Телевидения. 4ое издание. / В.Е.Джакония, А.А. Гоголь, Друзин Я.В. и др. Учебник для вузов. 4-е изд., стереотип. - М.: Горячая линия - Телеком. 2007. - 616 с: ил. ISBN: 978-5-9912-0004-2.
2. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений / Л. П. Ярославский. – Москва: Советское радио, 1979. – 498 с.
3. Солodka В.И. Оценка погрешностей координат 3D ТВ объектов / Солodka В.И., Ошаровская Е.В., Патлаенко Н.А. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТПП-13-2014). Матеріали 13 міжнародної НТК, 6 – 12 червня 2014: тезиси докл. – Одеса – 2014. – С. 37 – 39.
4. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2): ETSI TS 102 831 v1.1.1. ETSI, 2010. – 213 с.
5. Ананич А.В. Стандарт DVB-T2: новый этап в развитии наземного цифрового вещания [Электронный ресурс]: нормативная и аналитическая информация. / А.В. Ананич. – 2012. Режим доступа к статье <http://giprosvjaz.by/infresource/?q=node/254486>.

### References

1. Dzhakoniya V.E. Televidenie. 4oe izdanie. / V.E.Dzhakoniya, A.A. Gogol, ?Druzin YA.V. i dr. Uchebnik dlya vuzov. 4-e izd., stereotip. - M.: goryachaya liniya - Telekom. 2007. - 616 s: il. ISBN: 978-5-9912-0004-2.
2. Yaroslavskij L. P. vvedenie v cifrovuiu obrabotku izobrazhenij / L. P. Yaroslavskij. – Moskva: Sovetskoe radio, 1979. – 498 s.
3. Solodka V.I. Ocenka pogreshnostej koordinat 3D Tv ob'ektiv / Solodka V.I., Osharovskaya E.V., POatlaenko N.A. // Vuviruivalna ta obchislualna tehnika v tekhnologichnukh procesakh (VOTPP-13-2014). Materialu 13 mizhnarodnoj NTK, 6 – 12 chervnyia 2014: nezu dop. – Odesa – 2014. – S. 37 – 39.
4. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2): ETSI TS 102 831 v1.1.1. ETSI, 2010. – 213 p.
5. Ananich A.V. Standart DVB-T2: novuj etap v razvitij nazemnogo cifrovogo veshhaniya [Electronnuj resurs]: normativnaya i analiticheskaya informachiya. / A.V. Ananich. – 2012. rezhim dostupa k state <http://giprosvjaz.by/infresource/?q=node/254486>

## ПОБУДОВА СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ, АНАЛІЗУ ТА ОЦІНКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ РЕГІОНАЛЬНОГО РІВНЯ ДЛЯ СИТУАЦІЙНИХ ЦЕНТРІВ АПК

*Розглядаються питання, пов'язані з розробкою та моделюванням автоматизованих систем моніторингу і аналізу економічних даних регіонального рівня. Необхідним методом мінімізації помилок при ухваленні рішень є застосування спеціальних методів і технологій обробки інформації, у статті розглянуто перспективні методи і моделі моніторингу сільськогосподарського виробництва для ситуаційних центрів АПК.*

*Ключові слова: моніторинг, інформаційні технології, ситуаційні центри, сільське господарство.*

O.B. VIUNENKO, A.V. TOLBATOV, S.V. AGADZHANOVA, A.B. SHANDYBA

Sumy National Agrarian University

V.A. TOLBATOV

Sumy state university

S.V. TOLBATOV

National aviation university

### DEVELOPMENT OF MONITORING, ANALYSIS AND DECISION MAKING ASSESSMENT FOR REGIONAL SITUATIONAL CENTERS OF AGRICULTURE

*Annotation. The questions related to the modeling and automated monitoring and analysis of economic data at the regional level. Necessary methods to minimize errors in decision-making is the use of special techniques and technologies of the information in the article the advanced methods and models for monitoring agricultural production situational centers of agriculture.*

*Keywords: monitoring, information technology, situational centers, agriculture.*

#### Вступ

Поняття моніторингу часто вживається в сучасному суспільстві і проникає у все нові сфери господарської практики. Поняття моніторингу обов'язково включає: спостереження за об'єктами моніторингу, облік і контроль за їх станом, аналіз динаміки зміни цього стану і синтез моніторингової інформації для використання на різних рівнях управління. Тобто моніторингові системи мають деякі загальні характеристики, що дозволяє виділити моніторинг в єдину інформаційну сутність, реалізація якої здійснюється в рамках управлінської діяльності, а також розробити концепцію його опису, створення методичного і технологічного забезпечення інформаційних систем класу моніторингових [1–9].

**Розгляд проблеми.** Метою моніторингу є визначення наявності ресурсів у агропромислового комплексу та його окремих підкомплексів, потреби в додатковому надходженні ресурсів і згладжуванні ефекту від наявності додаткових ресурсів у іноземних конкурентів. Досягнення зазначеної мети здійснюється через вирішення низки взаємопов'язаних завдань:

- 1) порівняльний фінансово-економічний аналіз регіонального виробництва і іноземних постачальників;
- 2) порівняльний виробничо-господарський аналіз регіонального виробництва і іноземних постачальників;
- 3) аналіз динаміки основних показників діяльності регіональних агропромислових комплексів (АПК) та основних експортерів агропродовольчої продукції;
- 4) аналіз актуальних і потенційних конкурентних переваг національних та іноземних постачальників.

У системі такого моніторингу також проводиться оцінка стану земельних ресурсів, відстеження процесів ліцензування і контроль виконання ліцензійних умов, аналіз режимів користування природними ресурсами, планування природоохоронних заходів та ін. Інформація про об'єкти моніторингу в області управління регіональних АПК характеризується великими обсягами, різноманітністю, просторовою прив'язаністю, недоступністю об'єктів для прямого вивчення, а відповідні бази даних — територіальною розподіленістю.

**Виклад основного матеріалу.** В даний час роль інформаційних моніторингових систем в АПК зростає, проте їх використання гальмується відсутністю затверджених оцінних показників об'єктів моніторингу, узгоджених систем класифікації інформації, дублюванням інформаційних потоків і функціонального навантаження між організаціями АПК. Відсутність уніфікації розробок веде до появи дублюючих і несумісних між собою інформаційних систем, використовуються різні методики і технології їх побудови, формати зберігання даних і кодування інформації.

Високий ступінь невизначеності і нелінійних характер перебігу подій в умовах гострих соціальних

конфліктів, розробка заходів щодо стабілізації соціально-економічної ситуації в регіоні, вимагають адекватного моделювання альтернативних варіантів рішень і знаходження єдиного вірного рішення в кожній унікальній ситуації. Саме тому, поряд з традиційними інформаційними технологіями необхідно застосовувати інтелектуальні технології: оперативний аналіз, моделювання, інтелектуальний аналіз та системи підтримки прийняття рішень. Інтегрування таких технологій, як інтелектуальних систем підготовки та підтримки прийняття управлінських рішень і автоматизованих систем моніторингу розвитку та інвестиційної привабливості територій в ситуаційні центри, підвищують ефективність і оперативність підготовки заходів з питань життєдіяльності регіону. Тому розробка заходів спрямованих на розробку і створення методичних основ побудови інтелектуальних системи моніторингу, аналізу та прийняття рішень для керівників АПК регіону з використанням теорії експертних систем, системного аналізу і прийняття рішень, методології ситуаційного моделювання дозволить проводити моделювання сценаріїв та наслідків прийнятих рішень в режимі реального часу, а також проводити інтелектуальну оцінку рішень на основі математичних методів.

В даний час при інтенсифікації процесів управління в органах влади зростає роль інтелектуальних автоматизованих систем підтримки прийняття управлінських рішень. Такі системи є основною організаційно-аналітичною ланкою регіонального ситуаційного центру (РСЦ). До першочергових завдань при розробці проектів РСЦ АПК можна віднести: а) розробку моделей (інформаційної, структурно-функціональної), які становлять основу інтелектуальної системи; б) розробку алгоритму роботи інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень; в) дослідження взаємозв'язків між різними системами: аналізу та моніторингу, експертними системами, системами підтримки прийняття рішень і прогнозування для оптимізації функціонування РСЦ. Аналітичний огляд показав високу ефективність застосування засобів аналізу та експертної підготовки рішень, таких як Deductor Analyzer. У структурі ситуаційного центру інтелектуальна система моніторингу дозволяє об'єднати різноманітні і часто неузгоджені технології, а також засоби і методи, що використовуються для зберігання, аналізу, обробки та видачі інформації. Високий ступінь невизначеності і нелінійний характер перебігу подій потребують побудову узагальненої моделі інформаційних потоків для всіх режимів функціонування ситуаційного центру при організації та передачі даних від однієї підсистеми до іншої. Використання методів теорії прийняття рішень (багатокритеріальних, нейронних мереж, генетичних алгоритмів), теорії прогнозування, теорії систем і системного аналізу, а також геоінформаційних систем (ГІС) в рамках єдиної системи дозволяє отримувати із заданим рівнем точності максимально достовірні рішення для прогнозування розвитку ситуації або проблеми. Існуючі інтелектуальні алгоритми підбору системи критеріїв, формування процесу генерації альтернативних рішень і методики «комплексного» використання методів оптимізації і вибору «вирішуючого правила» для ситуаційних і прогнозуючих систем показали перспективність їх застосування для вирішення завдань різного роду в умовах нечіткої вихідної інформації.

В основі організаційно-управлінської компоненти автоматизованих систем моніторингу АПК повинні лежати принципи формування та обробки спеціалізованих баз даних, що дозволяють зберігати, здійснювати швидкий доступ і пошук фактичних даних, необхідних для вирішення завдань організації та управління. До таких даних відноситься інформація про природні умови, про стан ґрунтового покриву, про стан поверхневих і ґрунтових вод, про стан рослинності, про стан земної поверхні, про забруднення навколишнього природного середовища, земельно-кадастрові дані, про нерухоме майно АПК, а також дані про стан людських ресурсів АПК регіону.

Поряд з інформаційними ресурсами, задіяними в інформатизації сфери, в організаційно-управлінську компоненту повинні входити й інші засоби інформаційних і телекомунікаційних технологій, які формують інформаційну базу управління регіональних АПК. Тому важливу роль у формуванні інформаційних ресурсів для РСЦ грає інформація «управлінського характеру», зміст якої має включати кілька основних структурних складових:

- інформаційні матеріали та документи, що визначають всі сфери діяльності регіональних АПК, зокрема, законодавчі та інші нормативно-правові акти і договірні зобов'язання, дані контрольних актів та ін.;
- дані по нормах, нормативах, стимулах, які регулюють виробничу, соціальну, культурну та іншу діяльність регіональних АПК;
- відомості, що відображають матеріальні та соціальні параметри діяльності сфери АПК;
- відомості про кількісний та якісний склад, рівні підготовки персоналу, задіяного у сфері АПК, а також сукупність даних, що характеризують наявний кадровий потенціал регіону;
- відомості по науково-дослідній та інноваційній діяльності в регіоні;
- відомості про технічне та фінансове забезпечення сфери АПК.
- дані про зв'язки сфери регіональних АПК з іншими галузями економіки;

Зазначені інформаційні складові, будучи включеними в середовище ГІС, повинні відповідати рівню і масштабам інших інтегрованих в таке середовище інформаційних ресурсів, відповідних керуючих підсистем та їх ланок.

Загалом проблему систематизації та інтеграції програмних засобів, що відповідають за автоматизацію управління регіональних АПК, з іншими компонентами, можливо поетапно вирішити, якщо використовувати наступні принципи організації автоматизованих систем моніторингу АПК:

- надання найвищого пріоритету розробці і впровадженню інформаційних технологій та

інформаційних ресурсів управлінського призначення;

- необхідність системної інтеграції інформаційних ресурсів і технологій, що входять в середовище, тобто інформатизація управління надає необхідний соціальний та економічний ефект тільки за умови, що створені і впроваджені інформаційні ресурси і технології не стануть чужорідними елементами, а будуть природним чином інтегровані в процес функціонування регіональних АПК;
- поетапне формування середовища згідно єдиного і заздалегідь визначеного стратегічного плану побудови всіх компонентів середовища;
- відкритість створених автоматизованих систем моніторингу, що дозволить сфері АПК повноцінно інтегруватися в інформаційне середовище регіону і галузі [2].

В Україні земля є одним з основних об'єктів при формуванні інвестиційної політики держави, базовим елементом майнових стосунків і головної складової стосунків власності на нерухомість. Її важливе значення підкреслюється державною аграрною політикою, основними цілями якої є збереження земель сільськогосподарського призначення як природного ресурсу. Очевидно, що для ефективного управління земельними ресурсами також необхідна наявність цілісної і достовірної інформації про стан і використання земель, які можуть бути одержані в результаті здійснення централізованого державного моніторингу земель сільськогосподарського призначення. Вище ми відзначали, що ефективним інструментом інформаційного забезпечення моніторингу земель сільськогосподарського призначення є автоматизована інформаційна система моніторингу регіонального АПК. При цьому повинні здійснюватися безперервне забезпечення її необхідною інформацією, включення в систему інструментів пошуку, отримання, зберігання, накопичення, передачі, обробки інформації, а також організація баз даних.

Загалом кожен об'єкт моніторингу земель сільськогосподарського призначення описується набором показників, що визначають характер його використання або ступінь придатності для реалізації конкретних господарських цілей, а також властиві йому природні і антропогенні ознаки. При цьому під показником моніторингу земель мається на увазі якісна або кількісна характеристика стану і використання земель [3].

Інформація, що надходить в результаті проведення державного моніторингу земель, призначена зрештою для використання в цілях управління земельними ресурсами, але на практиці, як правило, ми маємо справу із управлінням окремими територіями або регіонами. Таким чином структура інформаційної моделі системи автоматизованого моніторингу регіонального АПК, може бути представлена у вигляді сукупності підсистем, показаних на Рис.1:

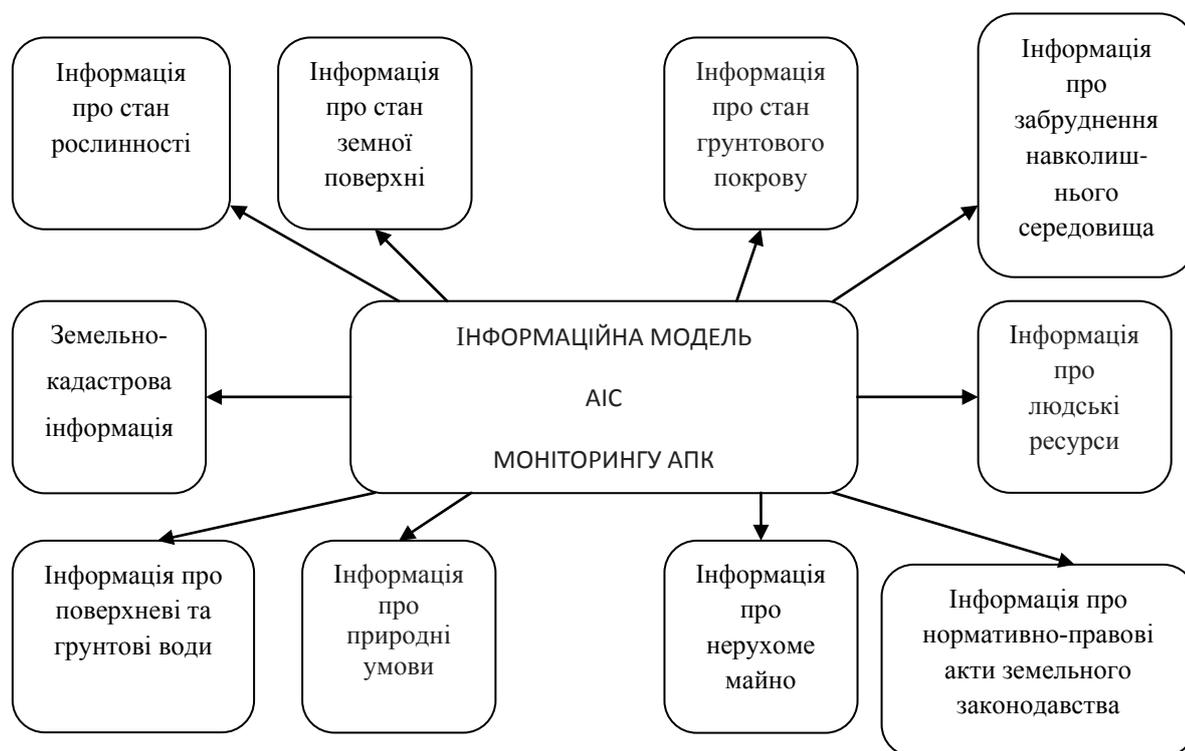


Рис 1. Структура інформаційної моделі автоматизованої моніторингової системи

- підсистема інформації про природні умови;
- підсистема інформації про стан ґрунтового шару;
- підсистема інформації про стан поверхневих і ґрунтових вод;
- підсистема інформації про стан рослинності;
- підсистема інформації про стан земної поверхні;
- підсистема інформації про забруднення навколишнього природного середовища;
- підсистема інформації земельно-кадастрових даних;

- підсистема інформації про нерухоме майно;
- підсистема інформації про людські ресурси регіону;
- підсистема інформації про нормативно-правові акти земельного законодавства.

Інформаційне забезпечення відстеження ефективності функціонування регіонального АПК має відповідати параметрам моделі розвитку АПК, а також завдань, що вирішуються за допомогою моніторингу. Це в подальшому дозволить виключити надлишок інформації, а також скоротити час на її обробку. Сама формалізація аналітичних матеріалів передбачає вирішення завдань, пов'язаних з вибором методів і моделей аналізу, що безпосередньо залежить від якості зібраної інформації. Тому для ефективного управління регіональним АПК в сучасних умовах необхідно проведення не тільки моніторингу ходу виробництва, але і відстеження ринково-орієнтованих сторін його діяльності, а саме таких критеріїв, як стійкість, конкурентоспроможність, рівень капіталізації та ефективність окремих груп підприємств і районів (табл. 1). Для забезпечення сталого та ефективного розвитку такої найважливішої складової економіки України, якою є агропромисловий комплекс, необхідно виконання комплексу заходів для створення адекватного умовам ринкової економіки механізму управління, найважливішою частиною якого є моніторинг [4].

Таблиця 1

**Рівень методичної розробленості моніторингу функціонування регіонального АПК**

Мета моніторингу	Критерії оцінки	Показники моніторингу	Рівень розробленості та апробації
1. Моніторинг динаміки рівня стійкості галузі	1. Конкурентоспроможність підприємств 2. Ефективність бізнесу 3. Фінансова стійкість 4. Оцінка бізнесу та рівень капіталізації	Групи, що характеризують: 1. конкурентоспроможність 2. ефективність бізнесу 3. фінансову стійкість 4. оцінку бізнесу і рівень капіталізації	Методика розрахунку недостатньо розроблена Розроблена і застосовується Розроблена і застосовується Недостатньо розроблена
2. Моніторинг відповідності необхідним пропорціям і композиції частин та елементів галузі між собою	Відповідність науково обґрунтованим нормам і нормативам, які забезпечують оптимальні пропорції і композицію в просторі та інших складових бізнесу	Групи показників і нормативів, що забезпечують аналіз і оцінку пропорційності та композиції елементів підприємницької діяльності в галузі	Методики добре розроблені і застосовуються на практиці. Показники деяких частин бізнесу потребують подальшого теоретичного та методичного опрацювання
3. Моніторинг ступенів розвитку підприємства з метою забезпечення досягнення найбільш високого рівня потенціалу можливого на кожному етапі розвитку	Ефективність процесів відтворення підприємства та окремих складових елементів бізнесу (основних засобів, технології, навичок працівників та ін.)	Групи показників, що характеризують ефективність процесів відтворення і окремих елементів складових бізнесу	Найбільш добре розроблені та апробовані методики оцінки аналізу відтворювальних процесів елементів виробництва
4. Моніторинг забезпечення галузі (підприємств) достатньою кількістю якісної інформації про їх внутрішнє і зовнішнє середовище	Адекватність, своєчасність і якість інформації	Показники оцінки якості управлінської інформації	Методики існують. Показники мають обмежене практичне застосування
5. Моніторинг забезпечення раціонального набору елементів структури бізнесу, що забезпечує явища позитивної синергії	Досягнення позитивного ефекту від об'єднань підприємств (синергетичний ефект)	Показники досягнення синергії	Методики знаходяться в стадії розробки.

Існуючі системи автоматизованого моніторингу найчастіше будуються на основі декомпозиції, тому

така технологія моніторингу близька до традиційних методів системотехніки. Вона надає можливість проводити розбиття (декомпозицію) складної комплексної системи на ієрархію більш дрібних підсистем нижнього рівня з подальшим їх локальним аналізом. Далі, на основі результатів локального аналізу вибудовується загальносистемна картина. Цілісність процесу моніторингу забезпечується за рахунок спеціальних, моделей, побудованих на стику цілого ряду інформаційно-комп'ютерних технологій. Інваріантність до предметних областей сфери моніторингу досягається за рахунок виявлення і використання їх загальних системних рис і закономірностей.

Перевагою такого підходу є простота і наочність моделей, добре відпрацьований і надійний математичний апарат, алгоритмічна простота, чисельна статистична точність результатів моніторингу, наочність моніторингових звітів. Але моніторинг на основі декомпозиції обмежується порогом складності сфери моніторингу, наприклад, при аналізі структурно складних кластерів АПК: різко ускладнюється процес декомпозиції; велика розмірність результатів локального аналізу та їх похибки ведуть до неприпустимого накопиченню похибки загальних аналітичних висновків; вимоги до апаратного забезпечення моніторингу потребують неприпустимо великих матеріальних вкладень; методи декомпозиції і подальшої індукції результатів локального аналізу не враховують схильність складних систем до самоорганізації.

Тому для реалізації інваріантної до предметної області системи моніторингу (Рис. 2) пропонується розглядати сферу моніторингу в п'яти основних аспектах [5]:

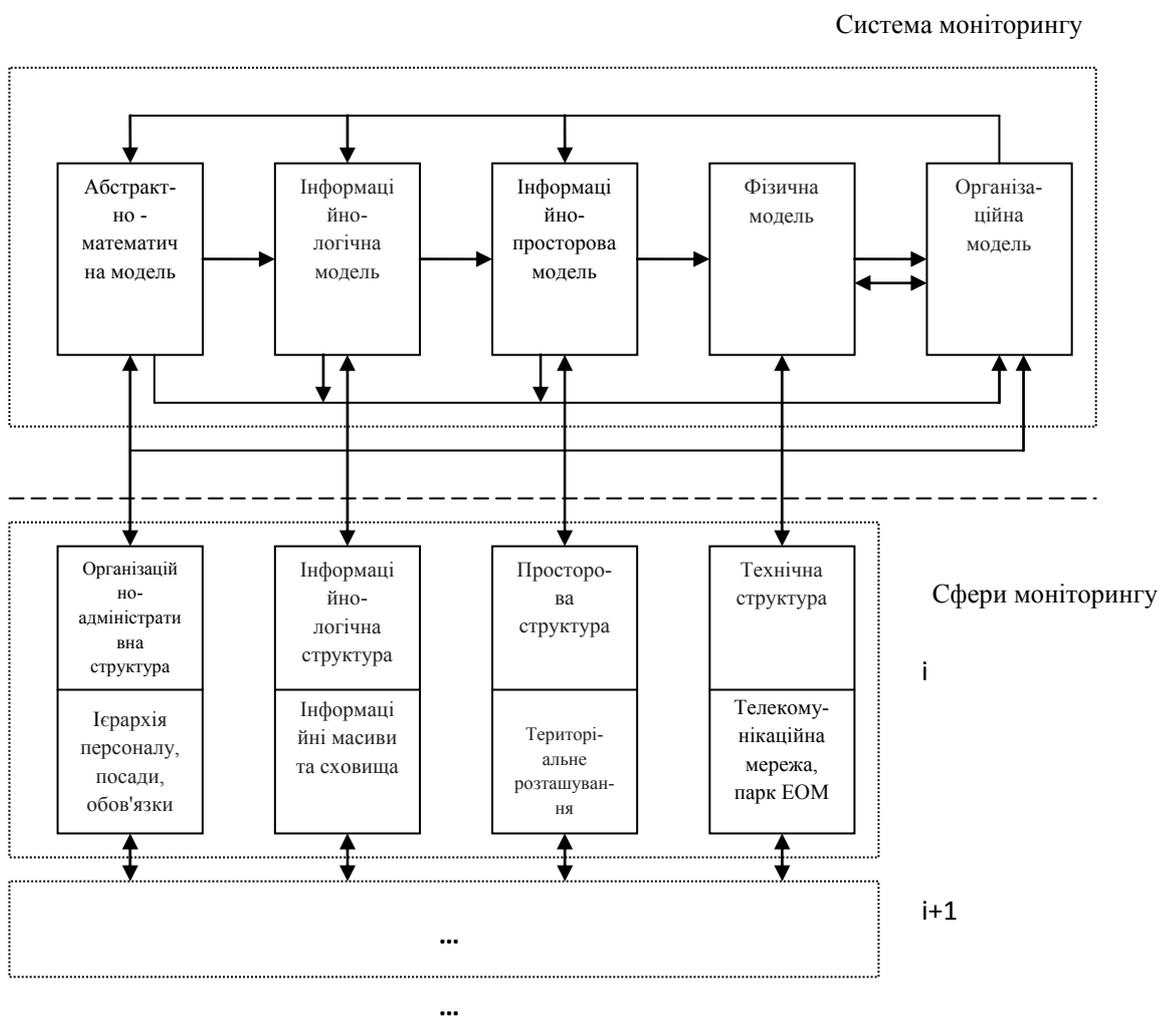


Рис. 2. Загальна структура системи автоматизованого моніторингу

1. Загальносистемний аспект - сфера моніторингу розглядається з погляду гетерогенних інформаційних та організаційних зв'язків, а також з точки зору їх класифікацій, що виникають під час моніторингу.

2. Логічний аспект - сфера моніторингу розглядається з погляду ієрархічної декомпозиції загальної структури її учасників за критеріями інформаційної сумісності і з урахуванням їх організаційної підпорядкованості.

3. Просторовий аспект - сфера моніторингу розглядається з урахуванням її навколишнього просторово-географічного середовища.

4. Фізичний аспект - сфера моніторингу розглядається з погляду властивих її учасникам інформаційних масивів, програмно-апаратних платформ, протоколів обміну, прав доступу до інформації і

телекомунікаційного середовища.

5. Організаційний аспект - сфера моніторингу розглядається з погляду системотехніки, теорії управління інформаційними та технічними системами, вироблення управлінських рішень, прогнозування.

Необхідного відзначити, що останнім часом виявилася тенденція до відмови від різного роду моніторингових досліджень, оскільки останні досить дорогі і громіздкі. Проте, враховуючи високу економічну значущість якості реалізації стратегій регіонального розвитку АПК, без систематичних досліджень обійтися неможливо. Підвищити ж ефективність моніторингових досліджень можливо шляхом використання наступної методики [6].

1. Визначення цілей створення і критеріїв функціонування системи автоматизованого моніторингу.
2. Формування набору чинників, що характеризують стан регіонального АПК.
3. Формалізація вибраних в п. 1 критеріїв, їх узгодження.
4. Відбір інформативних ознак (чинників).
5. Розробка організаційно-функціональної схеми системи моніторингу.
6. Формування інформаційної бази.
7. Виділення репрезентативної сукупності типових представників, які можуть служити індикаторами змін зовнішніх умов.
8. Проведення моніторингових досліджень типових представників.
9. Корегування організаційно-функціональної схеми системи моніторингу у разі виявлення значних змін індикаторних елементів, додаткова діагностика їх станів.
10. Розробка і ухвалення управлінських рішень.

Дана методика припускає систематичне стеження лише за обмеженим числом суб'єктів регіональної економіки і лише в надзвичайних випадках, тобто при виході станів за межі допустимої області. Дана міра покликана скоротити витрати на проведення досліджень, збільшити здібність системи адаптуватися до режиму зміни умов зовнішнього середовища. Але реалізація по такій методиці спеціалізованої системи моніторингу АПК регіону вже здатна забезпечити інформаційну основу ухвалення рішень у сфері стратегічного планування розвитку регіону з можливістю адаптивного підстроювання її характеристик під потреби вирішення задач управління.

В даний час через швидке зростання кількості вихідних даних, необхідних керівникам компаній, міністерств, регіональних та місцевих органів влади для аналізу ситуації і оцінки прийняття рішень виникають проблеми, що пов'язані з низькою ефективністю управління, оперативністю і якістю рішень (Рис. 3). Тому саме ситуаційні центри, які є високотехнологічними і комплексними інструментами для моніторингу процесів і прийняття управлінських рішень мають стати кінцевою реалізацією сучасних автоматизованих систем моніторингу. Загалом ситуаційний центр - це складний апаратно-програмний комплекс, який включає в себе безліч компонентів, що забезпечують:

- збір, обробку та аналіз різномірної інформації з різних джерел;
- аналіз та експертну оцінку кризових ситуацій;
- оперативний доступ до інформаційних ресурсів ситуаційного центра;
- автоматизацію процесів підготовки інформації для прийняття управлінських рішень;
- організацію та забезпечення інформаційної та технологічної підтримки проведення заходів із застосуванням сучасних методик колективної роботи, засобів прогнозування і моделювання розвитку ситуацій;
- здійснення контролю за виконанням рішень;
- об'єднання інформаційних систем з різною складовою в єдиний інформаційний простір.

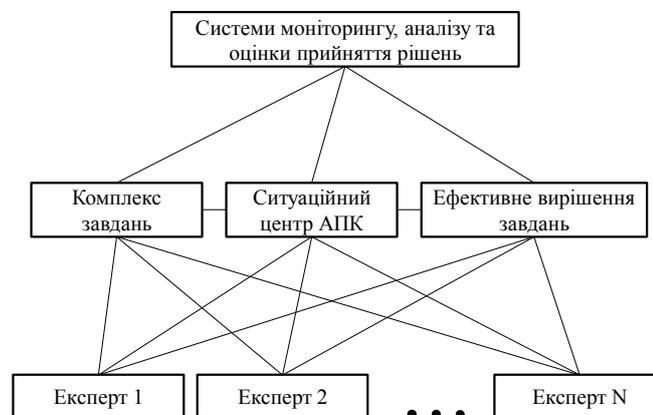


Рис. 3. Загальна структура системи моніторингу, аналізу та оцінки прийняття рішень регіональних центрів АПК

Реалізація автоматизованої системи моніторингу сільського господарства дає можливість дієво використовувати статистичні, оперативні та звітні дані агропромислового комплексу як регіону, так і

окремого господарства. За допомогою Web-технологій створюється єдиний інформаційний простір в масштабах регіону, в якому проблеми окремого господарства стають предметом уваги вищих органів.

Система моніторингу містить комплекс якісних і кількісних характеристик, що відображають ситуацію в агропромисловій галузі:

- динаміку і структуру обсягів виробництва;
- географічну структуру виробництва і споживання в галузі;
- динаміку і структуру експортно-імпортних потоків у галузі;
- аналіз економічних позицій підприємств галузі (порівняльний аналіз за будь-якими параметрами: обсяги та структура виробництва продукції, ринкова частка, близькість до джерел сировини, боргове навантаження, рентабельність продукції та інше);
- інвестиційну ситуацію в галузі та основні інвестиційні проекти в регіоні;
- стратегію розвитку галузі та перспективи її реалізації в період кризи, прогнози розвитку галузі;
- аналіз найбільш важливих поточних факторів розвитку галузі.

**Висновки.** Система моніторингу консолідує відомості про обсяги виробництва, реалізації, ресурсах, державну підтримку підприємств агропромислового комплексу регіону, дозволяє виявити пріоритетні сфери для реалізації регіональних цільових програм, а також оперативного контролювати їх результативність. Базовою метою регіональної політики в галузі агропромислового комплексу є забезпечення збалансованого соціально-економічного розвитку регіону, створення максимально сприятливих умов для розвитку товаровиробників, що в сукупності становить основу для зростання рівня і якості життя населення та соціально-економічного розвитку держави в цілому.

Розробка та впровадження ситуаційних центрів АПК регіону дозволить:

- сформувані єдиний інформаційний, методологічний та правовий простір моніторингу агропромислового комплексу;
- здійснювати кількісний аналіз конкурентної стійкості галузі;
- проводити якісну оцінку наявності та доступності природних, матеріальних, трудових, інфраструктурних та інших факторів агропромислового виробництва;
- здійснювати якісний аналіз наявності та складу ресурсної бази, необхідної для забезпечення конкурентоспроможності агропромислових підприємств регіону;
- здійснювати аналітичну роботу по соціально-економічному розвитку господарств, використовуючи дані розвитку кожної території і суб'єкта в цілому;
- бачити пріоритетні області для використання програмно-цільового методу й оцінювати результативність регіональних цільових програм галузі;
- відслідковувати поточний стан і проводити модернізацію інфраструктури агропромислового виробництва регіону;
- планувати заходи щодо стимулювання якості державних послуг громадянам і підприємствам;
- розвивати взаємодію держави і громадянського суспільства, а дані моніторингу можуть стати основою створення Інтернет-порталу.

### Література

1. Митракова О. В. Информационно-аналитические системы мониторинга недропользования. М., 2011, 103 стр., соавторы Аракчеев Д.Б., Любимова А.В.
2. Гиниятов И.А., Ильиных А.Л. Особенности систематизации и интеграции информации при разработке автоматизированной информационной системы мониторинга земель для целей АПК [Текст]: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук по спец. 25.00.26 – «Землеустройства, кадастр и мониторинг земель» И.А. – Гиниятов, А.Л. Ильиных // ГЕО-СИБИРЬ-2010: сб. материалов VI Междунар. науч. конгр., 19-29 апр. 2010г. – Новосибирск: СГГА, 2010 – Т.3, ч.1. – С. 241-245.
3. Гиниятов И. А. Формирование информационной модели автоматизированной информационной системы мониторинга земель сельскохозяйственного назначения / И. А. Гиниятов, А. Л. Ильиных // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. -Новосибирск:СГГА, 2012. т.Т. 3.-С.С. 37-41.
4. Пакулин С.Л., Третьяк В.П., Положенцева Е.Л. Концептуальный подход к мониторингу функционирования регионального АПК // Междунар. науч. конф. «Научное пространство Европы-2008». – www.rusnauka.com.
5. Бершадский А.М, Бождай А.С. Методы и модели информационного мониторинга социальной инфраструктуры территорий / Известия ВолгГТУ, Вып. № 1., 2007, С. 19-25.
6. Пшиканоква Н.И. Формирование концептуальной модели мониторинга и управления в процедурах стратегического планирования развития региона / Ученые записки РГСУ , Вып. № 7 , Том 2, 2009, С. 159-163.
7. Толбатов В.А., Добророднов О.А., Толбатов А.В., В'юненко О.Б., Толбатов С.В. Оцінка повноти захисту технологічного обладнання від відмов у системі управління / “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”. – Вип.№ 3(52). – Хмельницький, 2015. – С.30-33.
8. Толбатов А.В. Моніторинг інформаційних процесів як складова частина функціонування газотурбінної електростанції / Матеріали V науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих

науковців: "Комп'ютерний моніторинг та інформаційні технології – 2009" (12-15 травня 2009 р.). – Донецьк, ДонНТУ, 2009. – С. 374-376.

9. Толбатов А.В., Толбатов В.А., Толбатов С.В. Техніко-економічне обґрунтування побудови систем управління підвищеної надійності / Вісник Сумського державного університету. Серія: «Технічні науки». – №3. – Суми, 2012 – С. 68-71.

10. Толбатов А.В. Инновационные подходы к развитию сельского хозяйства. Глава 1. Инновационные подходы информационной поддержки деятельности агропромышленного комплекса региона [Текст] / А.В. Толбатов, В.А. Толбатов, А.Б. Вьюненко, Г.А. Смоляров, Ю.Г. Смоляров, С.Н. Виганяйло, Я.В. Долгих, М.Н. Рубан // Монография. – Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2015. – С.7-26.

11. Лавров Є.А., В'юненко О.Б. Методологія комп'ютерної технології упереджуючого управління для АПК регіону // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві та природокористуванні», НУБіП (13-14 червня 2013 р.) - Київ, 2013. – С. 183-184.

12. Лавров Е.А., Вьюненко А.Б. Разработка концепции единого информационного пространства региона для мониторинга уровней социально-экономического развития.// Материалы III Всероссийской научной конференции "Информационные технологии в науке, образовании и экономике", 10-14 ноября 2008 г., г. Якутск - Якутск: Институт математики и информатики ЯГУ, 2008. - Часть II. - С. 171-173.

13. В'юненко, О.Б. Проблеми створення моделі системи автоматизованого моніторингу сільського господарства [Текст] / О.Б. В'юненко //Вісник Сумського НАУ. Серія: Економіка і менеджмент – Суми, 2015.

14. В'юненко О.Б., Толбатов А.В., Агаджанова С.В., Толбатов В.А., Толбатов С.В. Віртуальні когнітивні центри як інтелектуальні ІТ системи моніторингу та оцінки роботи регіональних агропромислових комплексів / "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах". – Вип.№ 2(51). – Хмельницький, 2015. – С.112-116.

15. В'юненко О.Б., Толбатов А.В., Агаджанова С.В., Толбатов В.А., Толбатов С.В. Модель віртуального когнітивні центру як інтелектуальної ІТ системи для систем моніторингу агропромислових комплексів / Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: матеріали XIV міжнар. наук.-техн. конференції (5-10 червня 2015 р., м.Одеса) – Хмельницький, 2015 №3. С. 147-148.

#### References

1. Mitrakova O. V. Informacionno-analiticheskie sistemy monitoringa nedropolzovaniya. M., 2011, 103 str., soavtory Arakcheev D.B., Lyubimova A.V.

2. Giniyatov I.A., Ilinx A.L. Osobennosti sistematizacii i integracii informacii pri razrabotke avtomatizirovannoj informacionnoj sistemy monitoringa zemel dlya celej APK [Текст]: dis. na soisk. uchen. step. kand. texn. nauk po spec. 25.00.26 – «Zemleustrojstva, kadastr i monitoring zemel» I.A. – Giniyatov, A.L. Ilinx // GEO-SIBIR-2010: sb. materialov VI Mezhdunar. nauch. kongr., 19-29 apr. 2010g. – Novosibirsk: SGGА, 2010 – Т.3, ch.1. – С. 241-245.

3. Giniyatov I. A. Formirovanie informacionnoj modeli avtomatizirovannoj informacionnoj sistemy monitoringa zemel selskoxozyajstvennogo naznacheniya / I. A. Giniyatov, A. L. Ilinx // Interespo GEO-Sibir-2012. -Novosibirsk:SGGA, 2012. t.T. 3.-S.S. 37-41.

4. Pakulin S.L., Tretyak V.P., Polozhenceva E.L. Konceptualnyj podxod k monitoringu funkcionirovaniya regionalnogo APK // Mezhdunar. nauch. konf. «Nauchnoe prostranstvo Evropy-2008». – www.rusnauka.com.

5. Bershadskij A.M, Bozhday A.S. Metody i modeli informacionnogo monitoringa socialnoj infrastruktury territorij / Izvestiya VolgGTU, Vyp. № 1., 2007, S. 19-25.

6. Pshikanokova N.I. Formirovanie konceptualnoj modeli monitoringa i upravleniya v procedurax stratericheskogo planirovaniya razvitiya regiona / Uchenye zapiski RGSU, Vyp. № 7, Tom 2, 2009, S. 159-163.

7. Tolbatov V.A., Dobrorodnov O.A., Tolbatov A.V., V'yunenko O.B., Tolbatov S.V. Ocinka povnoti zaxistu texnologichnogo obladnannya vid vidmov u sustemi upravlinnya / "Vimiryuvalna ta obchislyuvalna texnika v texnologichnix processax". – Vip.№ 3(52). – Xmelnickij, 2015. – С.30-33.

8. Tolbatov A.V. Monitoring informacijnix procesiv yak skladova chastina funkcionuvannya gazoturbinoj elektrostancij / Materiali V naukovno-texnichnoj konferencii studentiv, aspirantiv ta molodix naukovciv: "Komp'yuternij monitoring ta informacijni texnologii – 2009" (12-15 travnya 2009 r.). – Doneck, DonNTU, 2009. – С. 374-376.

9. Tolbatov A.V., Tolbatov V.A., Tolbatov S.V. Техніко-економічне обґрунтування побудови систем управління підвищеної надійності / Вісник Сумського державного університету. Серія: «Технічні науки». – №3. – Суми, 2012 – С. 68-71.

10. Tolbatov A.V. Innovacionnye podxody k razvitiyu selskogo xozyajstva. Glava 1. Innovacijni podxodi informacijnoj pidtrimki diyalnosti agropromislovogo kompleksu regionu [Текст] / A.V. Tolbatov, V.A. Tolbatov, A.B. Vyunenko, G.A. Smolyarov, Yu.G. Smolyarov, S.N. Viganajlo, Ya.V. Dolgix, M.N. Ruban // Monografiya. – Odessa: KUPRIENKO SV, 2015. – С.7-26.

11. Lavrov Є.А., В'юненко О.Б. Методологія комп'ютерної технології упереджуючого управління для АПК регіону // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві та природокористуванні», НУБіП (13-14 червня 2013 р.) - Київ, 2013. – С. 183-184.

12. Lavrov E.A., Vyunenko A.B. Razrabotka koncepcii edinogo informacionnogo prostranstva regiona dlya monitoringa urovnej socialno-ekonomicheskogo razvitiya.// Materialy III Vserossijskoj nauchnoj konferencii "Informacionnye texnologii v nauke, obrazovanii i ekonomike", 10-14 noyabrya 2008 g., g. Yakutsk - Yakutsk: Institut matematiki i informatiki YaGU, 2008. - Chast II. - S. 171-173.

13. В'юненко, О.Б. Проблеми створення моделі системи автоматизованого моніторингу сільського господарства [Текст] / О.Б. В'юненко //Вісник Сумського НАУ. Серія: Економіка і менеджмент – Суми, 2015.

14. В'юненко О.Б., Толбатов А.В., Агаджанова С.В., Толбатов В.А., Толбатов С.В. Віртуальні когнітивні центри як інтелектуальні ІТ системи моніторингу та оцінки роботи регіональних агропромислових комплексів / "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах". – Вип.№ 2(51). – Хмельницький, 2015. – С.112-116.

15. В'юненко О.Б., Толбатов А.В., Агаджанова С.В., Толбатов В.А., Толбатов С.В. Модель віртуального когнітивні центру як інтелектуальної ІТ системи для систем моніторингу агропромислових комплексів / Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: матеріали XIV міжнар. наук.-техн. конференції (5-10 червня 2015 р., м.Одеса) – Хмельницький, 2015 №3. С. 147-148.

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ ДАНИХ В СИСТЕМАХ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

*В роботі розглядається складна технічна система з напрямленим об'єктом управління та можливості для впровадження інформаційних технологій в них. Запропоновано використання методики ідентифікації параметрів об'єктів, що спостерігаються та відновлення функціональних залежностей методом експоненціального згладжування.*

*Ключові слова: інформаційна технологія, ідентифікація параметрів, складна технічна система, відновлення функціональних залежностей, спостереження, супровід об'єктів.*

О.О. SHELUKHA

National aviation university, Kyiv.

### INFORMATION TECHNOLOGY OF DATA PROCESSING IN SUPERVISION SYSTEM OF TECHNICAL FACILITIES

*Abstract – In solving problems of analysis of information management systems is necessary to use certain numerical methods and algorithms. This will improve the quality and performance of complex technical systems.*

*The complex technical system with the directional control object is considered in this article. Since modern systems has underdeveloped system of tracking, we proposes a block of parameter identification and automatic tracking of the dynamic objects. To perform the problem tracking methodology was established to create a mathematical model of object surveillance and for the problem of restoration of functional dependencies used exponential smoothing method.*

*For further development of this topic we proposing to optimization model system considering additional parameters that affect the complex technical system.*

*Keywords: information technology, complex technical system, tracking, parameter identification.*

#### Вступ

Завдання автоматизації роботи як в цілому складних технічних систем так і окремих їхніх функцій не втрачає своєї актуальності. Більш того, постійний розвиток інформаційних технологій дозволяє не тільки ефективно використовувати нові методики виконання технічними системами різноманітних задач, а й оптимізувати їх шляхом впровадження додаткових систем, не втрачаючи у швидкодії та надійності.

#### Аналіз досліджень та публікацій

При вирішенні задач аналізу та синтезу інформаційних систем управління виникає необхідність використання певних числових методів та відповідних їм алгоритмів. Останнім часом широкого поширення в теорії управління отримав уніфікований підхід до вирішення завдань аналізу та синтезу систем, заснований на використанні методів просторів стану. Підхід полягає у широкому залучення методів лінійної алгебри до складання і дослідження диференціальних рівнянь систем автоматичного регулювання. Перевагою методу є можливість використання обчислювальної техніки для вирішення завдань теорії автоматичного регулювання. Використання цього методу було детально описано Кучеровим Д.П. і Камишиним В.В. [1]. Теорія систем спостереження та забезпечення стабілізації в них розглядаються Бесекерським В.А., Фабрікантом Є.А. та Поповим Є.П. в монографіях [2, 3]. Ними розглядаються питання забезпечення точності систем стабілізації навігаційної системи без збурення носія. Реально ж при установці навігаційної системи на рухомі об'єкти, на них діють збурення в широкому діапазоні частот, що значно ускладнює завдання забезпечення необхідної точності стабілізації і вимагає додаткових досліджень та математичного апарату, що розглядається авторами в наступних монографіях [4-6]. Математичний апарат необхідний для створення математичних моделей та прогнозування майбутніх подій достатньо глибоко розглянуто в монографіях [7, 8]. Проведений аналіз показав великі можливості розвитку інтелектуальних систем відновлення функціональних залежностей в складних технічних системах, розробці яких і буде присвячена ця стаття.

#### Постановка задачі

Завданням роботи є розробка та використання інформаційних систем супроводу об'єкта в складних технічних системах, що дозволить виконувати необхідні дії під час руху та впливу дестабілізуючих факторів зовнішнього середовища.

#### Викладення основного матеріалу

На сьогодні добре відомо методи визначення кутових відхилень рухомих об'єкта (РО). Широко розроблюються та використовуються методи стабілізації як об'єкту управління (ОУ), так і усієї платформи. Проблема спостереження та супроводу об'єктів менш розповсюджена, особливо задача прогнозування руху об'єкта при тимчасовій втраті його з поля зору.

Для розв'язання поставленої задачі необхідно розробити інформаційну систему автоматизованої стабілізації лінії візування та супроводу спостережуваного об'єкта в рухомій складній технічній системі – програмно-апаратний блок у якому виконуються розрахунки необхідні для стабілізації платформи (автомобіль, корабель, літальний апарат тощо) з розташованими на ній вимірювальними і спостережними

приладами (камера, лазерний вказівник, далекомір, вузьконаправлена антена тощо), а також за результатами спостереження створюється математична модель об'єкта, що має супроводжуватись, виконується прогнозування положення об'єкта у випадку втрати його з поля зору.

Перш за все розглянемо роботу системи що існує. При спостереженні за рухомих об'єктом використовується оптико-електронний модуль, що передає зображення на екран оператора. Оператор може повністю вручну наводити об'єкт управління на РО, або використовувати напівавтоматичний режим, що використовує зворотній зв'язок з блоком гіроскопічних пристроїв та вирівнювати лінію візування ОУ. Проте наведення на РО все одно виконується оператором.

З вищезазначеного можемо зробити висновок, що у зазначеній системі не використовуються можливості сучасної обчислювальної техніки, що дозволяє виконувати автоматичний супровід РО використовуючи дані, отримані з оптико-електронного модуля. Це висвітлює необхідність розробки та впровадження інформаційної системи супроводу, що включатиме в себе підсистему ідентифікації параметрів, буде розраховувати математичну модель об'єкта, що спостерігається та дозволить виконувати прогнозування його положення у випадку втрати об'єкта з поля зору.

На рисунку 1 показано схему управління складною технічною системою з запропонованим блоком супроводу об'єктів.



Рис. 1. Блок-схема системи управління складною технічною системою

Система вказана на рис.1 працює за наступною методикою. Перш за все система може працювати в декількох режимах – ручного, напівавтоматичного та автоматичного управління. На початку роботи система проводить спостереження зовнішнього середовища, дані (візуальне та теплове зображення) з оптико-електронного модуля подаються на екрани пульта управління, де оператор має змогу спостерігати та візуально виявляти об'єкти для дослідження. Далі оператор може проводити супровід спостережуваного об'єкта в ручному режимі, або обрати напівавтоматичний чи автоматичний режим роботи. При спостереженні нерухомого об'єкту оператор вмикає напівавтоматичний режим, що включає в себе систему зворотнього зв'язку першого рівня – використання блоку гіроскопічних пристроїв. Використовуючи показники вертикального та горизонтального гіротахметрів блок управління формує сигнали управління для відповідних механічних приводів об'єкту управління, що забезпечує стабілізацію лінії візування забезпечуючи захист системи від впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів, що виникають при русі платформи. При переході на автоматизований режим роботи – вмикається система зворотнього зв'язку другого рівня, що включає в себе інформаційну систему ідентифікації параметрів спостережуваного об'єкта, та відновлення функціональних залежностей лінії візування спостережуваного об'єкту у випадку тимчасової втрати його з поля зору.

Принцип роботи цієї інформаційної системи вказано на рис 2. Він полягає в наступному. З оптико-електронного модуля до блоку ідентифікації параметрів надходить зображення спостережуваного об'єкта, що було зафіксовано оператором системи. За цим зображенням виконується розрахунок параметрів руху цього об'єкта, а з блоку гіроскопічних пристроїв надходять значення впливу зовнішніх збурень, які використовуються для кореляції зображень. Після проведення порівняння отриманих даних про об'єкт з математичною моделлю, та встановивши наявність РО на зображенні та виконується розрахунок сигналів зміщення ОУ для супроводу РО. Після цього, розрахувавши наступні координати об'єкта спостереження дані записуються у математичну модель а дані про зміщення та прогнозоване зміщення передаються до блоку управління, що, в свою чергу, формує управляючі сигнали, що забезпечує не лише стабілізацію, як у напівавтоматичному режимі, а й вирівнювання вісі візування ОУ з врахуванням переміщень спостережуваного РО.

Розрахунок координат зміщення виконується за наступною методикою.

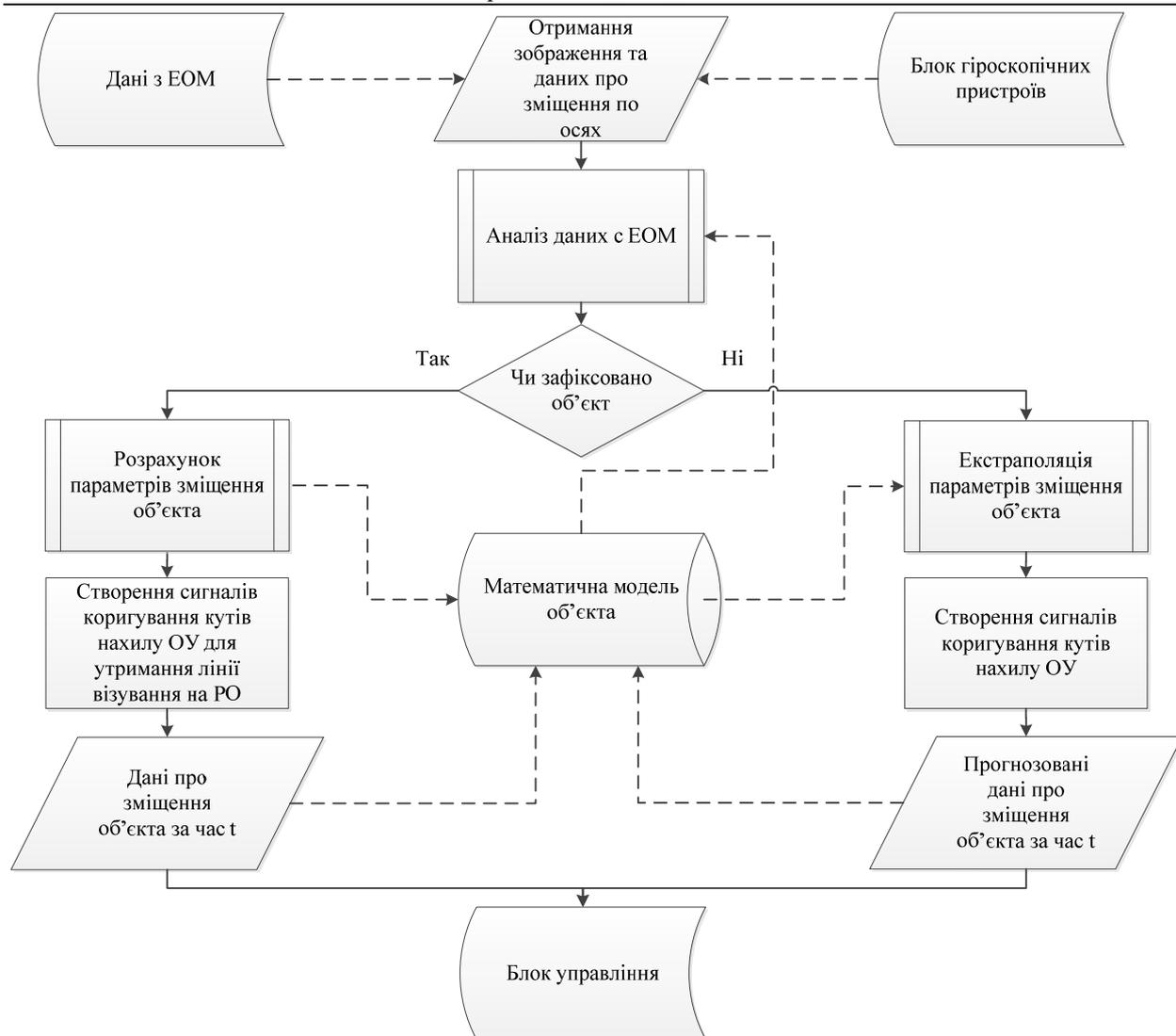


Рис. 2. Схема роботи блоку супроводу об'єктів

Перш за все визначаються такі характеристики об'єкта, як розмір, координати середньої точки, відстань до об'єкта. В подальшому ці дані будуть порівнюватись з більш новими даними та за ними буде визначатися, чи присутній об'єкт на зображенні, чи потрібно проводити екстраполяцію за вже відомими даними.

Розглянемо математичний апарат блоку супроводу об'єктів.

$x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  та  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$  – крайні горизонтальні та вертикальні координати об'єкта відповідно, що використовуються для визначення розмірів спостережуваного РО за наступними формулами

$$\Delta x(t) = |x_1(t) - x_2(t)|,$$

$$\Delta y(t) = |y_1(t) - y_2(t)|.$$

Далі визначаємо  $S(t) = \Delta x(t) * \Delta y(t)$  – індикатор розмірів об'єкта, використовується для перевірки наявності об'єкта: РО може зникнути з поля зору повністю або частково, сховавшись за візуальну перешкоду (будівлі, хвилі, дерева) в результаті параметр буде відрізнятись.

Визначаємо  $\Delta S(t) = |S(t) - S(t-1)| < \Delta S_{don}$  – обмеження для включення режиму відновлення функціональних залежностей (супроводу без візуальної фіксації об'єкта). Якщо об'єкт присутній тоді використовуються лінійні функції з врахуванням переміщення РО, та даних про відхилення лінії візування ОУ з блоку гіроскопічних пристроїв.

Наступним кроком є визначення координат центру об'єкта –  $Z_x(t)$ ,  $Z_y(t)$ . Для цього використовуються  $g_x(t)$ ,  $g_y(t)$  – дані про зміщення по осях, що надходять з блоку гіроскопічних пристроїв

$$Z_x(t) = x_{cep} + g_x(t),$$

$$Z_y(t) = y_{cep} + g_y(t),$$

де  $x_{cep} = \frac{x_1(t) + x_2(t)}{2}$ , та  $y_{cep} = \frac{y_1(t) + y_2(t)}{2}$ .

Після цього інформаційна система розраховує дані, що передаються до блоку управління, який генерує управляючі сигнали на приводи ОУ, за наступними формулами

$$\Delta Z_x(t) = Z_x(t) - Z_x(t-1),$$

$$\Delta Z_y(t) = Z_y(t) - Z_y(t-1).$$

У випадку зникнення РО з поля зору – використовується методика екстраполяції функції переміщення даного РО за даними з розрахованої математичної моделі, що включає попередньо збережені дані про положення об'єкта, та його переміщення. Для цього обрано метод експоненціального згладжування, що працює на основі методу ковзаючого середнього, проте використовує вагові коефіцієнти, що зменшуються при віддаленні за часом від моменту прогнозування.

Першим кроком визначаємо константу згладжування ( $0 < \alpha < 1$ ), а після цього обчислюємо прогнозовану  $x^*(t)$  формулою

$$x_{cep}^*(t) = \alpha x_{cep}(t-1) + \alpha(1-\alpha)x_{cep}(t-2) + \alpha(1-\alpha)^2 x_{cep}(t-3) + \dots,$$

або спрощено за рекурентною формулою

$$x_{cep}^*(t) = \alpha x_{cep}(t-1) + (1-\alpha)x_{cep}^*(t-1).$$

Так само обраховується прогнозування  $y_{cep}^*(t)$ .

Коефіцієнти при  $x_{cep}(t-1)$ ,  $x_{cep}(t-2)$ ,  $x_{cep}(t-3)$ , ... поступово зменшуються, тим самим ця процедура призначає найбільший коефіцієнт останнім (за часом) даним.

Вибір константи згладжування  $\alpha$  впливає на точність прогнозування рухомого об'єкта. На практиці значення  $\alpha$  обирається в межах від 0.01 до 0.3.

В подальшому дана схема передбачає проведення моделювання з врахуванням реальних даних про роботу складної технічної системи, з вдосконаленням методів визначення конкретних коефіцієнтів та врахуванням додаткових похибок.

### Висновки

У статті розглянуто існуючу модель складної технічної системи та запропоновано інформаційну систему автоматизованого супроводу рухомого об'єкта, що спостерігається. Наведено формули для відновлення функціональних залежностей та прогнозування руху цього об'єкта. Предметом подальших наукових досліджень буде оптимізація даної моделі з врахуванням додаткових параметрів, що впливають на складну технічну систему.

### Література

1. Кучеров Д.П. Синтез адаптивных систем терминального управления; Монография. / Д.П. Кучеров, В.В. Камишин. – К. : Инфосистем, 2010. – 232 с.
2. Бесекерский В.А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. / Бесекерский В.А., Фабрикант Е.А. – Л.: Судостроение, 1968. – 350с.
3. Бесекерский В.А. Теория автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Изд. 4-е, перераб. И доп. – СПб, изд-во «Профессия», 2003. – 752с.
4. Системи наведення та стабілізації озброєння: Монографія. / Безвесільна О.М., Квасніков В.П., Цірук В.Г., Чіковані В.В. – Київ: НАУ, 2014. – 176с.
5. Сейдж Э.П. Идентификация систем управления, Эндрю П. Сейдж, Джеймс Л. Мелса, издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, М., 1974, 248 с.
6. Алгоритмы и программы восстановления зависимостей / под редакцией В.Н. Вапника. — М.: Наука, 1984. — 816 с.
7. Таха, Х.А. Введение в исследование операций, 7-е издание.: Пер. С англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 912 с.
8. Экспериментальная механика: в 2-х кн.: Кн. 2. Пер с англ. / Под ред. А. Кобаяси. – М., Мир, 1990. – 552 с.

### References

1. Kuchero D.P., Kamishin V.V. Sintez adaptivnykh sistem terminal'nogo upravleniya: monografiya. Kyiv, "Infosistem", 2010, 232p.
2. Besekerskiy V.A., Fabrikant Ye.A. Dinamicheskii sintez sistem giroskopicheskoy stabilizatsii Leningrad, "Sudostroyeniye", 1968, 350 p.
3. Besekerskiy V.A., Popov Ye.P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. St. Petersburg "Professiya", 2003, 752 p.
4. Bezvesil'na O.M., Kvasnikov V.P., TSiruk V.G., CHikovani V.V. Sistemi navedennya ta stabilizatsii ozbroennya. Kyiv, NAU, 2014, 176 p.
5. Seydzh E.P., Melsa D.L. Identifikatsiya sistem upravleniya. Moscow "Nauka", 1974, 248 p.
6. Algoritmy i programmy vosstanovleniya zavisimostey. Ed. by V.N. Vapnik, Moscow, "Nauka", 1984, 816 p.
7. Takha, K.H.A. Vvedeniye v issledovaniye operatsiy. Moscow, Izdatel'skiy dom «Vil'yams», 2005, 912 p.
8. Eksperimental'naya mekhanika: v 2-kh kn.: Kn. 2. Ed. by A. Kobayasi. Moscow, "Mir", 1990, 552 p.

УДК 519.248\_057.165:005.336.2

О. І. ЛАКТИОНОВ

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка (ПНТУ), Полтава, Україна

А. М. СІЛЬВЕСТРОВ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## **МОДЕЛЬ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ СПІВРОБІТНИКА, ЯК ФУНДАМЕНТАЛЬНА ОСНОВА МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ ФАХІВЦЯ ТЕХНІЧНОГО ПРОФІЛЮ**

*Розкрито методику оцінювання інтегральної компетенції фахівця технічного профілю, яка ґрунтується на використанні моделі індивідуальної компетенції співробітника. Визначено основні етапи застосування методики, розкрито сутність складання персонogramми та наведено детальний механізм її візуалізації. Здійснено опис обробки зібраних і накопичених даних про об'єкт діагностування. Сутністю такої обробки даних виступає аналіз інформації усіх джерел методами комп'ютерної обробки заснованих на принципах штучного інтелекту. Проведено опис механізму мовою предикатів та визначено детальну послідовність дій щодо оцінювання інтегральної компетентності фахівця технічного профілю, метою якого є визначення рівня професійної приналежності особи, що діагностується.*

*Ключові слова.* індивідуальна компетентність, фахівець технічного профілю, персонogramма, комп'ютерна обробка, штучний інтелект, мова предикатів, кваліметрія.

A. I. LAKTIONOV

Poltava national technical Yuri Kondratyuk university

A. N. SILVESTROV

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

## **MODEL INDIVIDUAL EMPLOYEE COMPETENCE AS A FUNDAMENTAL BASIS OF AN INTEGRATED METHODOLOGY FOR ASSESSING THE COMPETENCE OF TECHNICAL SPECIALISTS**

*Objective.* Explore the integrated methodology for assessing the competence of technical specialists, which is based on the use of models of individual staff competence. Identify the main stages of the application of techniques to reveal the essence of drawing up personogrammy and bring a detailed mechanism for its visualization. To carry out the description of the processing of the collected and historical data about the object of diagnosis. Spend description of the mechanism in terms of predicates and to determine the detailed sequence of actions to assess the competence of an integrated technical specialists.

*Research methods.* The study used a number of methods of scientific knowledge such as induction, deduction, system approach.

*The main results and conclusions.* Research methodology for assessing the competence of the integrated technical specialists, which is based on the use of models of individual staff competence, in essence limited to the use of a scale of assessment, that is, bringing the results obtained each trait to the same type of mind contributes to obtaining reliable results. The result of applying the model of individual competency employee has a valid conclusion regarding the relevant competent professional reference value, which corresponds to the standard of technical profile or negative.

*The presented method allows you to compare the levels of competence of specialists and expect a generalized indicator - the compliance rate, which is the main factor in the assessment. This technique helps to reduce subjectivity in the evaluation and selection by comparing the results of peer review within the framework of individual indicators according to certain rules and make recommendations to the person concerned on the facility diagnosis.*

*Keywords.* individual competence, technical specialists, personogramma, computer processing, artificial intelligence, language predicates qualimetry.

### **Вступ та постановка проблеми**

На сьогодні, на території України, у рамках загального підходу управління якістю і його забезпечення для будь-якої предметної галузі використовується низка стандартів міжнародної організації стандартів ISO [1]. Відносно наукового підходу – методи кваліметрії, яка вивчає і реалізує методики кількісного оцінювання якості об'єкту (продукції, процесу, послуги) [2].

В основі оцінювання інтегральної компетенції фахівця технічного профілю лежить модель індивідуальної компетенції співробітника, що у своєму складі має такі ознаки як: знання, уміння і навички (ЗУН); професійно важливі якості (ПВЯ); мотивацію (МТ) [3]. Вимірювання даних ознак відбувається за допомогою різних шкал. Однак, варто зазначити, що кожна з ознак поділяється на певні під ознаки, які, у свою чергу, представлено різними показниками, не завжди кількісними. Це, відповідно, спонукає до використання різних шкал оцінювання та проблем з обробкою результатів. Тому основним напрямком дослідження є сумісна обробка отриманих результатів застосування різних методів оцінювання, щодо визначення рівня компетентності фахівця технічного профілю.

*Мета роботи.* Дослідити методику оцінювання інтегральної компетенції фахівця технічного профілю, яка ґрунтується на використанні моделі індивідуальної компетенції співробітника. Визначити основні етапи застосування методики, розкрити сутність складання персонogramми та навести детальний механізм її візуалізації. Здійснити опис обробки зібраних і накопичених даних про об'єкт діагностування. Провести опис механізму мовою предикатів та визначити детальну послідовність дій щодо оцінювання

інтегральної компетентності фахівця технічного профілю.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Індивідуальна компетентність співробітника, як кількісний підхід до визначення рівня професійної здібності робітника вивчалася на протязі багатьох років, як вітчизняними так і зарубіжними вченими. До їх числа варто віднести: О. В. Марухіна, Г. Е. Шевельова [4], Л. Ф. Алексеева, О. Г. Берестнева [5], С. Холіфорд, С. Уїддет [6], С. В. Іванова [7] та багато інших.

З. С. Гельманова наводить різні підходи до визначення сутності поняття компетенція, порівнюючи два підходи до визначення (американський та європейський). За словами автора компетенція працівника це набір знань, навичок і вмінь, що сприяють успішному виконанню професійної діяльності [8].

Відносно кваліметричного та системного аналізу варто відзначити роботи В. І. Кирилова та В. М. Вдовіна, Л. Є. Суркова, В. А. Валентинова [9].

Автоматизований комп'ютерний підхід до визначення рівня професійної приналежності робітника до певного виду робіт розглядався на сторінках робіт О. Г. Берестневої та Є. А. Муратова [10]. Вони ж відокремили основні напрямки дослідження саме компетентності фахівця технічного профілю.

Проте незважаючи на значущість та обширність наукових розробок питання дієвої методики оцінювання інтегральної компетентності фахівця технічного профілю залишається відкритим і по нині, що спонукало до дослідження.

**Виклад основного матеріалу дослідження**

На початку проведення оцінювання інтегральної компетентності фахівця технічного профілю заповнюється персонограма, яка містить сукупність ознак, кількість яких необмежена, та у своєму складі має: методи ідентифікації якостей осіб, тип мислення, здібності працівників (творчі, організаторські, комунікативні), схильність до інженерної роботи з технічними приладами, до наукового підходу в роботі при вирішенні наукомістких питань, тип особи, почуття гумору, ораторські здібності, зовнішній привабливості і так далі. Всі показники або отримуються за усередненою чотирибальною шкалою (УЧШ), або перетворені до її значень. У загальному випадку всі показники діляться на три основні групи:

1. загальні результати експертного оцінювання фахівця, які опосередковано визначають рівень його знань, умінь і навичок;
2. результати експертного оцінювання професійно важливих якостей оцінюваного фахівця;
3. результати експертного оцінювання мотиваційної складової.

Наступним кроком оцінювання інтегральної компетентності фахівця технічного профілю виступає візуалізація персонограми (результатів оцінювання ознак). Яка представляється у вигляді багатокутника, площа якого розраховується по формулі [9]:

$$S_n = \sum_{i=1}^n S_i, \tag{1}$$

де  $S_i$  – площа трикутника, який утворюється шляхом з'єднання сусідніх значень  $v_i$  та  $v_{i+1}$  ;  
 $v_i$  – значення часткових показників.

Для обчислення площі трикутника довільної орієнтації застосуємо розрахункову формулу в прямокутній системі координат [9]:

$$S_{\Delta} = \left| [x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)] \right| / 2. \tag{2}$$

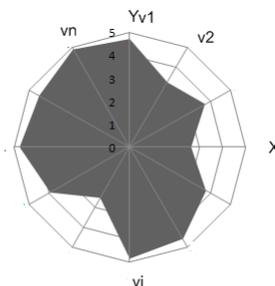


Рис. 1. Петлюсткова діаграма

Якщо одну з вершин трикутника, наприклад, третю, розмістити на початку координат, то формула (2) спроститься:

$$S_{\Delta} = |x_1 y_2 + x_2 (-y_1)| / 2. \tag{3}$$

У загальному випадку:

$$S_i = |x_i y_{i+1} + x_{i+1} (-y_i)| / 2, \tag{4}$$

де

$$x_i = v_i \sin[\alpha(i-1)]; y_i = v_i \cos[\alpha(i-1)]; \alpha = 2\pi/n.$$

Еталоном виступає правильний багатокутник, вписаний у круг радіусом, що відповідає максимальному значенню  $v_{\max}$  для вибраної шкали, є ідеальним формалізованим випадком фахівця технічного профілю. Площа розраховується по формулі (4) за умови  $v_i = v_{\max}$ . Коефіцієнт відповідності  $j$ -го оцінюваного фахівця, ідеальному образу розраховується як:

$$K_{CB_j} = S_{П_j} / S_E. \quad (5)$$

Наступним етапом оцінювання інтегральної компетентності фахівця технічного профілю є попередня обробка зібраних і накопичених даних про об'єкт діагностування. Сутністю такої обробки даних виступає аналіз інформації усіх джерел, її систематизацію, і підготовку до комп'ютерної обробки засобами прикладних програм, що входять до складу програмного забезпечення системи кадрового забезпечення підприємства, побудованої на принципах штучного інтелекту.

У свою чергу, створення систем штучного інтелекту передбачає використання евристичних і логічних методів опису знань в базах знань. Представимо модель обробки даних про оцінюваних фахівців мовою числення предикатів.

Задамо множину  $M$  як:

$$M = \{m_j\} \quad (6)$$

де  $j = 1, \dots, m$  – безліч оцінюваних по рівню компетенції фахівців технічного профілю, потужність або кардинальне число якого дорівнює  $m$ . Кожен з елементів  $m_j$ , цієї множини має деякий набір властивостей (ознак).

Набір ознак задається набором атрибутів:

$$V = \{v_i\} \quad (7)$$

де  $i = 1, \dots, n$ , наприклад, професійно важливі якості фахівця :  $v_1$  - дисциплінованість,  $v_2$  - наполегливість,  $v_3$  - рішучість і так далі.

Тоді можна стверджувати, що  $m_j \in M$  і має властивість  $m_j | V(m_j)$ .

Вважатимемо, що граничним значенням оцінюваних нечітких величин є деяке число  $\alpha \geq 4,00$ , яке в теорії нечітких великих кількостей називається  $\alpha$  - зрізом функції приналежності. Інакше кажучи, вважатимемо, що при оцінці  $m_j \in M$  того або іншого атрибуту  $v_j$ , значення величини  $\alpha \geq 4,00$  характеризує кращі якості фахівця, а  $\alpha < 4,00$  – навпаки.

Введемо в розгляд предикат  $G(m_j(v_i))$  який означає, що деякий фахівець  $m_j \in M$  має усі  $n$  властивості  $v_i \in V$ , які можуть бути виміряні у інтервалі  $[2,00 \dots 5,00]$ . Тоді справедливі аксіоми, які задають групи компетентних і некомпетентних фахівців відповідно:

$$\text{Аксіома 1. } \forall m_j G(m_j(v_1 \wedge v_2 \wedge \dots \wedge v_n) \geq 4,00) \rightarrow 1;$$

$$\text{Аксіома 2. } \forall m_j G(m_j(v_1 \wedge v_2 \wedge \dots \wedge v_n) < 4,00) \rightarrow 0.$$

Мовою предикатів отримаємо:

$$\text{Предикат 1. } \exists m_j \exists v_1 G(m_j, v_1) \rightarrow 1;$$

$$\text{Предикат 2. } \exists m_j \exists v_1 G(m_j, v_1 \wedge v_2) \rightarrow 1;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\text{Предикат } n. \exists m_j \exists v_1 G(m_j, v_1 \wedge v_2 \wedge \dots \wedge v_n) \rightarrow 1$$

Змістовна інтерпретація:

Предикат 1. Існує деякий фахівець  $m_j$ , який має властивість  $v_1$ . Цей предикат набуває значення 1, тобто істина.

Предикат 2. Існує деякий фахівець  $m_j$  що має властивості  $v_1$  і  $v_2$ . Цей предикат набуває значення 1, тобто істина, і так далі.

Подальша обробка отриманих результатів ґрунтується на наступній послідовності дій:

Для кожної групи (підгрупи) безлічі рівноважних властивостей (ознак) розраховується коефіцієнт відповідності компетентності  $j$ -го фахівця з формули (5):

Формується матриця  $V$  розмірності  $m \times k$ , де  $m$  – кількість об'єктів порівняння;  $k$  – кількість груп (підгруп) ознак (часткових показників) об'єктів порівняння:

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mk} \end{pmatrix}.$$

Розраховується вектор-стовпець  $R$ , складовими якого є  $\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_n \end{pmatrix}$  по вираженню:  $R = V \times W$ , де  $W = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_k \end{pmatrix}$  – вектор-стовпець значень вагових коефіцієнтів ознак,

який визначається експертами.

Вибирається фахівець, компетенція якого відповідає максимальному значенню елементу з вектора-стовпця  $R$  або декілька об'єктів в порядку зменшення значень оцінок  $r_j$ . У разі збігу оцінок рівня компетенції  $r_j$  окремих оцінюваних фахівців, на елементах великої кількості утворюється квазіпорядок. Квазіпорядок задовольняє умовам рефлексивності і транзитивності, він є узагальненням еквівалентності і нестрогого порядку. Ставлення, що є одночасно еквівалентністю і нестрогим порядком, є тотожна рівність.

5. Ряд переваг і остаточні висловлювання стосовно кожного з оцінюваних фахівців відносно рівнів їх компетентності надаються особі, що приймає рішення, як вивід.

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розробок у даному напрямку.** Дослідження методики оцінювання інтегральної компетенції фахівця технічного профілю, яка ґрунтується на використанні моделі індивідуальної компетенції співробітника, у своїй суті обмежується використанням однієї шкали оцінювання, тобто приведенням отриманих результатів з кожної ознаки до однотипного виду, що сприяє отриманню достовірних результатів. Результатом застосування моделі індивідуальної компетенції співробітника є достовірний вивід відносно відповідності компетентності фахівця еталонному значенню, що відповідає стандарту технічного профілю або негативний результат.

Представлена методика дозволяє порівнювати рівні компетенції фахівців і розраховувати узагальнений показник – коефіцієнт відповідності, який є основним фактором оцінки. Дана методика сприяє зменшенню суб'єктивності при оцінюванні і відборі шляхом порівняння значень результатів експертного оцінювання в рамках одиничних показників за певними правилами і формулювання рекомендацій зацікавленій особі щодо об'єкта діагностування.

### Література

1. ДСТУ ISO 9001:2009 Національний стандарт України система управління якістю. Вимоги.
2. Кириллов, В.И. Квалиметрия и системный анализ: Учебное пособие / В.И. Кириллов. – М.: НИЦ ИНФРА-М, Нов. знание, 2013. – 440 с.
3. Тернопільська В. І. Структура професійної компетентності майбутнього фахівця / В. І. Тернопільська // Науковий вісник Мелітопольського державного педагогічного університету : зб. наук. праць. – Мелітополь : Видавництво «Мелітополь», 2012. – С. 208–213. – (Серія «Педагогіка», вип. 9).
4. Марухина О. В., Шевелев Г. Е. Использование результатов экспертного оценивания для измерения компетентности студентов и выпускников технических университетов // Известия ТПУ. – 2009. – Т. 315. – № 5. – С. 199-203.
5. Алексеева Л.Ф., Берестнева О.Г., Шевелев Г.Е. Интегральные критерии оценки компетентности студентов технических университетов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3.
6. Холифорд С., Уиддет С. Руководство по компетенциям: Пер. с англ., – М.: Издательство ГИППО, 2008. – 228 с.
7. Иванова С.В. Методы оценки профильных компетенций // Справочник по управлению персоналом. Журнал российской практики HR-практики. 2002. – №12. – С.27–31.
8. Гельманова З.С. Оценка ключевых компетенций работников металлургического производства // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 9 – С. 101-105
9. Вдовин, В.М. Теория систем и системный анализ: Учебник для бакалавров / В.М. Вдовин, Л.Е. Суркова, В.А. Валентинов. – М.: Дашков и К, 2013. – 644 с.
10. Берестнева О. Г., Муратова Е. А. Компьютерный анализ данных. – Томск: Изд-во Томского государственного педагогического университета, 2010. – 304 с.

### References

1. DSTU ISO 9001:2009 Natsionalnyi standart Ukrainy systema upravlinnia yakistiu. Vymohy.

2. Kirillov, V.I. Kvalimetrija i sistemnyj analiz: Uchebnoe posobie, M.: NIC INFRA-M, Nov. znanie, 2013, 440 p.
3. Ternopil'ska V. I. Struktura profesiinoi kompetentnosti maibutnoho fakhivtsia, *Naukovyi visnyk Melitopolskoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu* : zb. nauk. prats, Melitopol : Vydavnytstvo «Melitopol», 2012, pp.208–213, (Seria «Pedahohika», . issue 9).
4. Maruhina O. V., Shevelev G. E. Ispol'zovanie rezul'tatov jekspertnogo ocenivanja dlja izmerenija kompetentnosti studentov i vypusnikov tehniceskikh universitetov, *Izvestija TPU*, 2009, vol.315, no. 5, pp.199-203.
5. Alekseeva L.F., Berestneva O.G., Shevelev G.E. Integral'nye kriterii ocenki kompetentnosti studentov tehniceskikh universitetov, *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*, 2012, no.3.
6. Holiford S., Uiddet S. Rukovodstvo po kompetencijam: Per. s angl., M.: Izdatel'stvo GIPPO, 2008, 228 p.
7. Ivanova S.V. Metody ocenki profil'nyh kompetencij, *Spravochnik po upravleniju personalom. Zhurnal rossijskoj praktiki HR-praktiki*. 2002, no.12, pp. 27–31.
8. Gel'manova Z.S. Ocenka ključevyh kompetencij rabotnikov metallurgičeskogo proizvodstva, *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*, 2014, no.9, pp. 101-105.
9. Vdovin, V.M. Surkova, L.E. Valentinov, V.A. Teorija sistem i sistemnyj analiz: Uchebnik dlja bakalavrov, M.: Dashkov i K, 2013, 644 p.
10. Berestneva O. G., Muratova E. A. Komp'juternyj analiz dannyh, Tomsk: Izd-vo Tomskogo gosudarstvennogo pedagogičeskogo universiteta, 2010, 304 p.

Рецензія/Peer review : 3.11.2015 р.

Надрукована/Printed :13.12.2015 р.

УДК 621.321.25

Н.В. ЗАХАРЧЕНКО, М.М. ГАДЖИЕВ

Одесская национальная академия связи им. А.С.Попова, Украина

## ФОРМИРОВАНИЕ КОДОВОГО МНОЖЕСТВА ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ОДНОГО БИТА С МАКСИМАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЕМКОСТЬЮ НАЙКВИСТОВОГО ЭЛЕМЕНТА

*Определена информационная емкость одного найквистового элемента на основании которого обоснована оптимальная длина корректирующего кодового слова при максимальной информационной емкости найквистового элемента, определены коэффициенты уравнения качества передачи. Приведены основные недостатки позиционного кодирования, и на основе результатов экспериментальных исследований обоснованы методы увеличения информационной емкости кодового слова за счет применения таймерных сигнальных конструкций*

*Ключевые слова: таймерные сигнальные конструкции, кодовое слово. момент модуляции, найквистовый элемент, межсимвольные искажения, информационная емкость элемента, «хорошее состояние канала».*

N. V. ZAKHARCHENKO, M. M. GADZHIEV

Odessa national academy of telecommunication nm. A.S. Popov, Ukrain

## THE FORMATION OF THE CODE SET FOR TRANSMITTING ONE BIT WITH THE MAXIMUM INFORMATION CAPACITY OF NIQUITAO ELEMENT

*Defined the information capacity of one niquitao object on the basis of which the optimal length of corrective code words with maximum information capacity niquitao element, the coefficients of the equations of the transmission quality. The main disadvantages of positional coding, and based on the results of experimental studies proved methods to increase information capacity of code words through the use of timerich signal designs*

*Keywords: time signal design, code word. the time modulation, naivety element, inter-symbol distortion, the information capacity of the element, "good state of the channel".*

### Введение

Используемые в настоящее время позиционные коды базируются на представлении десятичного номера кодового слова в десятичной системе в позиционной системе, использующей число различных значений информационного параметра канала ( $\square$ ).

$$N_{10} = \alpha_n a^{n-1} + \dots + \alpha_2 a^2 + \alpha_1 a^1 + \alpha_0 a^0 \quad (1)$$

где  $\alpha_i$  - значение коэффициентов  $\alpha_i \in 1;2$  ( $\square$ -1) согласно (1). Представим для примера десятичные числа 15 и 23 при основаниях  $a_2=2$  и  $a_3=3$  в виде (1)

$$N_{10} = 15$$

$$a_2 = 2 \quad 15 = 1 * 2^3 + 1 * 2^2 + 1 * 2^1 + 1 * 2^0 \rightarrow 1111$$

$$\alpha_i \in 0,1,0 \quad 23 = 1 * 2^4 + 0 * 2^3 + 1 * 2^2 + 1 * 2^1 + 1 * 2^0 \rightarrow 10111$$

$$a_3 = 3 \quad 15 = 1 * 3^2 + 2 * 3^1 + 1 * 3^0 \rightarrow 121$$

$$\alpha_i \in 0,1,2 \quad 23 = 2 * 3^2 + 1 * 3^1 + 2 * 3^0 \rightarrow 212$$

Из приведенных примеров видно, что в позиционной системе с увеличением основания систем " $\square$ " уменьшается число цифр для одного и того десятичного числа. Следует заметить, что это уменьшение связано с большим числом состояний информационного параметра [1].

### Анализ проблемы и постановка задачи

В канал связи каждый из коэффициентов  $\alpha_i$  разложения (1) передается сигналом длительностью элемента Найквиста. При этом при смене коэффициентов  $\alpha_i$  разложения (1) происходит модуляция (изменение информационного параметра "□"). Таким образом расстояние между смежными моментами модуляции  $\tau_{ci}$  кратно найквистовому элементу:  $i \in 1;2;m$

$$\tau_{ci} = it_0 \quad (2)$$

где  $m$  - число элементов Найквиста в кодовом слове на которых синтезируется кодовое множество  $M=a^m$ .

Учитывая, что количество информации которое содержится в одном кодовом слове  $I_1$  определяется числом возможных состояний (мощностью)  $M$  [2].

$$I_1 = \log_2 M = \log_2 a^m = m * \log_2 a \text{ бит} \quad (3)$$

Следовательно информационная емкость одного найквистового элемента:

$$I_0 = \frac{\log_2 a^m}{m} = \log_2 a \text{ бит}$$

К недостаткам позиционного кодирования следует отнести:

1. Линейная зависимость количества информации  $I_1$  от элементности кодового слова ( $m$ ).
2. Постоянство количества информации на один найквистовый элемент  $I_0 = \log_2 a$  при изменении интервала реализации  $T_c = mt_0$ .

### Таймерные коды как инструмент решения проблемы

Оценим указанные параметры для кодовых конструкций на основе таймерных сигналов.

Согласно [2] в таймерных сигналах информация содержится в длительностях  $\tau_{ci}$  отрезков сигнала "i", каждый из которых отличаются числом элементов

$$\tau_{ci} = t_0 + k\Delta (k \in 1;2;\dots;S) \text{ - целые} \quad (4)$$

Величина " $\Delta$ " определяется требуемой вероятностью смещения ( $P_3$ ) момента модуляции в "хорошем" состоянии канала [1]

$$P_3 = 2 \left[ 0,5 - \Phi \left( \frac{\Delta}{2\xi} \right) \right] \quad (5)$$

где  $\Phi \left( \frac{\Delta}{2\xi} \right)$  - интеграл вероятностей,  $\xi$  - среднеквадратическое отклонение момента модуляции на

выходе канала. Например при  $P_3 = 3 * 10^{-4}$  для  $S=7$  величина  $\Delta = \frac{t_0}{7} = 0,1428t_0$  (или 14,28% от длительности элемента найквиста " $t_0$ "). Тогда вероятность смещения момента модуляции (ММ) при  $\xi = 0,02t_0$  [2]

$$P(\theta = 1\Delta) = 2 \left[ 0,5 - \Phi \left( \frac{0,1428}{2 * 0,02} \right) \right] = 2[0,5 - 0,49984] \approx 2 * 10^{-4} \text{ т.е. меньше } P_3.$$

Можно показать, что число реализаций сигнальных конструкций  $N_{pm}$  на интервале "m" найквистовых элементов при заданном числе отрезков "i" и заданном значении S определяется [3]

$$N_{pm} = C_{ms-i(s-1)}^i = \frac{[ms - i(s-1)]!}{(s(m-i))! i!} \quad (6)$$

В таблице 1 приведены значения  $N_{pm}$  при  $i = 3$   $S \in 2;3;5;7;10$  для  $m \in 4 \div 10$  найквистовых элементов, рассчитанных по формуле (6) для  $i = 3$

Учитывая, что количество информации в одном кодовом слове  $I_{kc}$  определяется как  $\log_2 N_p$  в таблице 2 приведены информационные емкости кодовых слов на интервале m-элементов.

Учитывая выражение (6), информационная емкость найквистового элемента составляет:

$$I_{нк} = \frac{\log_2 N_p}{m} = \frac{[ms - i(s-1)]!}{m(s(m-i))! i!} \quad (7)$$

Таблица 1

m \ s	4	5	6	7	8	9	10
2	10	35	84	165	286	455	680
3	20	84	220	455	816	1330	2024
4	35	165	455	969	1771	2925	4495
5	56	286	816	1771	3276	5456	8436
6	84	455	1330	2925	5456	9139	14190
7	120	680	2024	4495	8436	14190	22100
8	165	969	2925	6545	12341	20825	32509
9	220	1330	4060	9139	17296	29290	45760
10	286	1771	5459	12341	23426	39711	62196

Таблица 2

m \ s	4	5	6	7	8	9	10
2	3,322	5,129	6,392	7,366	8,160	8,830	9,410
3	4,321	6,392	7,781	8,830	9,672	10,377	10,982
4	5,129	7,366	8,830	9,920	10,790	11,514	12,134
5	5,807	8,160	9,672	14,790	11,673	12,414	13,042
6	6,392	8,830	10,377	11,514	12,414	13,159	13,793
7	6,907	9,409	10,383	12,134	13,042	13,793	14,432
8	7,366	9,920	11,514	12,677	13,591	14,346	14,989
9	7,781	10,377	11,987	13,158	14,078	14,837	15,482
10	8,160	10,790	12,414	13,591	14,516	15,277	15,923

Значение  $I_{\text{нк}}$  для полученных в таблице 2 данных приведены в табл. 3

Таблица 3

m \ s	4	5	6	7	8	9	10
2	0,830	1,026	1,065	1,052	1,02	0,980	0,941
3	1,080	1,279	1,297	1,261	1,209	1,153	1,098
4	1,282	1,473	1,472	1,417	1,349	1,279	1,213
5	1,452	1,632	1,612	1,541	1,459	1,379	1,304
6	1,598	1,766	1,730	1,645	1,552	1,462	1,379
7	1,727	1,882	1,831	1,733	1,630	1,533	1,443
8	1,842	1,984	1,919	1,811	1,699	1,594	1,499
9	1,945	2,076	1,999	1,880	1,760	1,649	1,548
10	2,040	2,158	2,069	1,942	1,815	1,697	1,592
11	2,127	2,233	2,134	1,998	1,864	1,742	1,632
12	2,208	2,303	2,193	2,051	1,910	1,783	1,669

**Оценка полученных результатов**

Анализ таблиц 1-3 показывает:

1. С увеличением интервала реализации "m" ( $T_{ck} = mt_0$ ) число возможных сигнальных конструкций растет (табл. 1).
2. Информационная емкость одного кодового слова ( $\log_2 N_p$ ) также растет с увеличением интервала реализации "m" (табл. 2).
3. Информационная емкость одного элемента при увеличении m вначале растет (до  $m \leq 5$ ), а при  $m > 5$  начинает снижаться.
4. Для каждого "m" информационная емкость с ростом "S" увеличивается.

Как показано выше ограничением для S является вероятность смещения одного ММ на величину  $[P(\theta = 1\Delta)] < P_3$ .

Выбор параметра "S" целесообразно ограничивать значением S=8, так как при S>8 увеличивается вероятность ошибочного приема одного момента модуляции даже в "хорошем" состоянии канала Рис 1. Связано это с тем, что при  $S > 8$  растет значение  $\log_2 N_p$ , но еще быстрее растут потери за счет увеличения вероятности ошибки на  $\theta = 1\Delta$ . (5)

Учитывая то, что при  $m \in 5;6$  информационная емкость одного найквистового элемента максимальна, (табл. 3) кодовые слова целесообразно реализовывать на интервале  $T_{ck} = 5t_0$  или  $T_{ck} = 6t_0$ .

Рассмотрим последовательность выбора множества таймерных сигнальных конструкций которые более целесообразно использовать для передачи заданного множества различных сообщений.

Для примера оценим целесообразность передачи таймерными сигналами, имеющих три информационных отрезка ( $i = 3$ ) один байт информации по двоичному каналу ( $\alpha = 2$ ). Из условия ясно, что число реализуемых кодовых слов  $N_p = 2^8 = 256$ .

Если бы был канал без помех и не ставился вопрос "эффективной" с точки зрения времени передачи, то можно было бы воспользоваться позиционным кодированием, то есть задача состояла бы в реализации передачи на интервале  $T_{ck} = 8t_0$ , при соблюдении первого и второго критериев Найквиста:

1. Условие отсутствия интерференционных помех (отсутствие межсимвольных искажений (МСИ)).
2. Отсутствие изменения на выходе длительности импульсов, которые определяются передаточной функцией канала.

Следующая задача, которую необходимо решить при выборе множества разрешенных конструкций - определение признаков которыми должны обладать отобранные кодовые слова. Эти признаки должны позволять однозначное декодирование на приеме. Например при  $m=5$  согласно табл. 1 для  $i=3$  и  $S=5$  можно реализовать  $N_0 = 286$  реализаций. Но указанное кодовое множество  $N_p = 286$  не обладает никакими признаками отношения к заданному (разрешенному) множеству. В качестве признака отношение к заданному множеству можно взять длительности сигналов  $x_1, x_2, x_3$ . Например длительности их должны удовлетворять условию

$$x_1 + 2x_2 + 3x_3 = 0 \pmod{A_0} \tag{8}$$

Коэффициенты приведенного уравнения определяют кодовое расстояние отобранного множества  $M$  (ясно, что это кодовое множество определяется значением  $d$  согласно виду и структуре помех). Из уравнения (8) следует, что для отбора 256 реализаций необходимо чтобы общее число их составляло [3]  $N_p \geq 256 * A_0$ . При  $A_0 = 7$  общее число реализаций составит  $N_p = 256 * 7 = 1792$ .

Из таблицы 1 следует, что ближайшее большее число реализаций при  $m = 6, S = 7, N_p = 2024 > 1792$ .

Проведенные выше расчеты вероятности смещения  $P(\theta = 1\Delta)$  меньше заданного значения. При независимых смещениях отдельных ММ вероятность смещения двух ММ в кодовом слове будет

$$P(\theta = 2\Delta) = C_3^2 (1,2 * 10^{-4})^2 \approx 3,5 * 10^{-8}.$$

**Заключение**

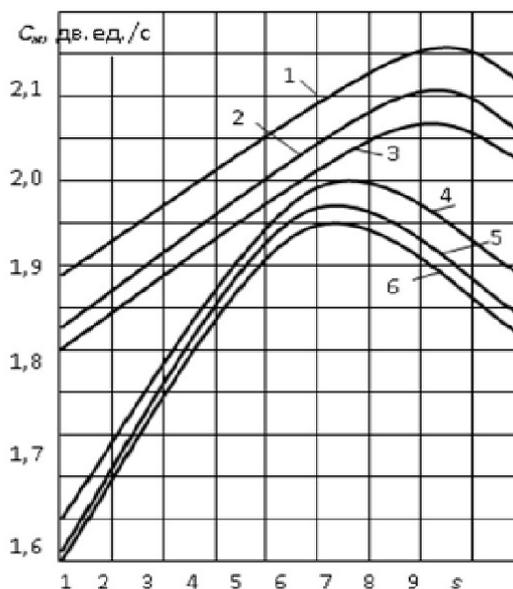
Из последнего расчета ясно, что в искаженных кодовых словах в основном будет искажен один переход на величину  $\theta = 1\Delta$ .

Следовательно таблица остатков уравнения (8) при смещении одного из трех ММ на  $\theta = 1\Delta$  будет иметь вид (таблица 4), [3].

**Таблица 4**

Переход \ Знак смещения	I	II	III
+	1	2	3
-	6	5	4

Таким образом каждое искажение одного ММ будет однозначно исправлено по указанным в табл. 4 синдромам.



**Рис. 1** Зависимость пропускной способности каналов с различным уровнем

Література

1. Захарченко Н.В. Пропускная способность каналов при таймерных сигнальных конструкциях / Н.В. Захарченко, М.М. Гаджиев, А.А. Русаловская // Матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції ОНАЗ ім. О.С. Попова, Одеса. - 2013. - С. 186-188.
2. Захарченко Н.В. Оптимизация синдромного метода исправления ошибок в адаптивных системах / Н.В. Захарченко, М.М. Гаджиев, С.И. Лысенко, Д.В. Талакевич // Восточно-европейский журнал передовых технологий. -2013. - №5/2 (65) - С. 13-18.
3. Захарченко Н.В. Повышение эффективности блокового кодирования при работе по нестационарным каналам связи / Н.В. Захарченко, М.М. Гаджиев, С.В. Горохов та інші, загалом 7 осіб // «ЭЛМ». – Баку (Азербайджан), 2009. - 362 с.

References

1. Zaxarchenko N.V. Propusknaya sposobnost kanlov pri tajmernih signalnykh konstrukciyax / N.V. Zaxarchenko, M.M. Gadzhiev, A.A. Rusalovskaya // materialy xii mizhnarodnoi naukovno-technichnoi konferencii onaz im. O.S. Popova, Odesa. - 2013. - s. 186-188.
2. Zaxarchenko N.V. Optimizaciya sindromnogo metoda ispravleniya oshibok v adaptivnyx sistemax / N.V. Zaxarchenko, M.M. Gadzhiev, S.I. Lysenko, D.V. Talakevich // vostochno-evropejskij zhurnalпередovyx tehnologij. -2013. - №5/2 (65) - s. 13-18.
3. Gaxarchenko N.V. povyshenie effektivnosti blokovogo kodirovaniya pri rabote po nestacionarnym kanalax svyazi / N.V. Zaxarchenko, M.M. Gadzhiev, S.V. Goroxov ta inshi, zagalom 7 osib // «elm». – baku (Azerbajdzhan), 2009. - 362 s.

Рецензія/Peer review : 9.11.2015 р.

Надрукована/Printed :13.12.2015 р.

УДК 004.891

О.В. КЛІЩ

Хмельницький національний університет

О.В. ОГНЄВИЙ

Хмельницький національний університет

## МЕТОД ВІДСЛІДКУВАННЯ МОБІЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ЗА ПЕРЕХОПЛЕНИМИ «ПРОБНИМИ» ПАКЕТАМИ ПІДКЛЮЧЕННЯ ДО WIFI

*На сьогоднішній день майже у кожного є пристрій із вбудованим WiFi модулем, для можливості підключення до бездротових мереж. Більшість із нас за день підключається до кількох бездротових мереж: вдома, на роботі, в кафе і т.д. У даній статті ми звернемо увагу на принципи утворення WiFi з'єднання між точкою доступу (роутером) та портативним пристроєм, розглянемо відмінності підключення різних пристроїв, а також типи «пробних» пакетів. На основі проведених досліджень було вибрано найбільш прості та доступні ресурси для вирішення поставлених завдань, розглянути недоліки і переваги створеного методу, а також перспективи його доопрацювання та застосування.*

**Ключові слова:** WiFi, точка доступу, пакет, відслідковування.

O.V. KLISHCH

Khmelnytsk national university

O.V. OHNIEVYI

Khmelnytsky national university, Ukraine

## METHOD OF TRACKING MOBILE DEVICE BY INTERCEPTED “TRIAL” FRAMES OF CONNECT TO WIFI

*Aim of the article is a justification of this method of tracking, its differences and Aim of the article is a study on this method of tracking its differences and features, compared to other methods of tracking. Nowadays almost everyone has a device with built-in WiFi module for connectivity options to wireless networks. Most of us during the day connects to some wireless networks: at home, at work, in cafes, etc. In this article we turn our attention to principles of creating Wi Fi connection between the access point (router) and portable device, consider the differences between various connection devices and the types of "test" packages.*

*Based on conducted research was chosen the most simple and available resources to solve the assigned tasks, consider the advantages and disadvantages of created method and perspectives of its improvement and use.*

**Keywords:** Wi-Fi, access point, package, tracking.

**Вступ.** Wi-Fi-технологія у наш час - це, насамперед, можливість отримувати доступ до Інтернету без наявності будь-яких проводів. Все що потрібно для створення бездротової мережі – це точка доступу (або, як її ще називають, Wi-Fi роутер) і хоча б один клієнт, тобто підключений до неї комп'ютер або мобільний пристрій.

Той факт, що у всіх сучасних портативних девайсах реалізовані функції Wi-Fi, полегшує застосування цієї технології в публічних місцях. Вже зараз доступ у Всесвітню павутину через Wi-Fi став нормою для відвідувачів кафе і ресторанів, студентів різних навчальних закладів, постояльців готелів тощо. Увійти в бездротову мережу можна не тільки з комп'ютера або ноутбука, але і з мобільного телефону. Більшість користувачів за день підключаються до кількох точок доступу: вдома, на роботі, в кафе і т.д. Отож нашим завданням є визначення точок доступу до яких підключався користувач, та визначення їх географічного розташування. Існують й інші методи визначення місцеположення девайсу, та наше завдання здобути якомога більший список мереж, до яких користувач підключався, для отримання більшого об'єму

інформації про власника пристрою.

**Постановка завдання.** В процесі реалізації методу постає декілька основних завдань.

1. Перехоплення пакету
2. Аналіз вмісту пакету
3. Отримання карти підключень

Для перехоплення пакетів потрібен лише ПК із вбудованим або підключеним Wi-Fi адаптером, та встановленим спеціальним ПЗ. Оскільки ноутбук із адаптером для безпроводного з'єднання в наш час достатньо, залишається лише вибрати необхідне ПЗ. У виборі ПЗ слід спиратися, в першу чергу, на встановлену на ПК операційну систему.

Аналіз вмісту полягає у виборі необхідної нам інформації, та певної систематизації отриманих даних.

Останнє з головних завдань, що постають в процесі реалізації даного методу, полягає в перенесенні отриманих, з перехопленого пакету, даних на карту.

**Основна частина.** Аналізатор трафіку, або сніфер — програма або програмно-апаратний пристрій, призначений для перехоплення і подальшого аналізу, або тільки аналізу мережного трафіку, призначеного для інших вузлів.

Перехоплення трафіку може здійснюватися:

- звичайним «прослуховуванням» мережевого інтерфейсу (метод ефективний при використанні в сегменті концентраторів (хабів) замість комутаторів (світчей), інакше метод малоефективний, оскільки на сніфер потрапляють лише окремі фрейми);
- підключенням сніфера в розрив каналу;
- відгалуженням (програмним або апаратним) трафіку і спрямуванням його копії на сніфер;
- через аналіз побічних електромагнітних випромінювань і відновлення трафіку, що таким чином прослуховується;
- через атаку на каналному (2) (MAC-spoofing) або мережевому (3) рівні (IP-spoofing), що приводить до перенаправлення трафіку жертви або всього трафіку сегменту на сніфер з подальшим поверненням трафіку в належну адресу.

Оскільки в «класичному» сніфері аналіз трафіку відбувається вручну, із застосуванням лише простих засобів автоматизації, то він підходить для аналізу лише невеликих його обсягів. Нас це абсолютно влаштовує, оскільки ми будемо аналізувати трафік одного пристрою.

Для реалізації я використовував ноутбук укомплектований вбудованим Wi-Fi адаптером, із встановленою операційною системою “Windows 7”. Проаналізувавши декілька сніферів я обрав Airodump-ng – аналізатор трафіку, котрий поміщає трафік у файли PCAP або ITT і показує інформацію про мережах.

```

CH 9 ][ Elapsed: 1 min ][ 2007-04-26 17:41 ][ WPA handshake: 00:14:6C:7E:40:80

BSSID                PWR  RXQ  Beacons    #Data, #/s  CH  MB   ENC  CIPHER AUTH ESSID
00:09:5B:1C:AA:1D    11  16      10         0   0  11  54.  OPN
00:14:6C:7A:41:81    34 100      57        14   1   9  11e  WEP  WEP
00:14:6C:7E:40:80    32 100     752       73   2   9  54   WPA  TKIP  PSK  teddy

BSSID                STATION            PWR   Rate   Lost  Packets  Probes
00:14:6C:7A:41:81   00:0F:B5:32:31:31  51   36-24   2     14
(not associated)   00:14:A4:3F:8D:13  19    0-0     0     4  mossy
00:14:6C:7A:41:81   00:0C:41:52:D1:D1  -1   36-36   0     5
00:14:6C:7E:40:80   00:0F:B5:FD:FB:C2  35   54-54   0    99  teddy
    
```

Рис. 1. Приклад роботи аналізатора трафіку Airodump-ng

Як бачимо на рис.1. кожен з підключених пристроїв надсилає точці доступу багато пакетів, на що вказують цифри у колонці Packets. Але нас цікавлять пакети Probe request frame, оскільки прочитавши саме його ми отримаємо необхідну нам інформацію, а саме - ім'я мережі та mac-адресу пристрою.

З інформації на рис.2. ми отримали:

- MAC адреса пристрою - 50:ea:d6:aa:bb:cc;
- ім'я мережі – SUBWAY;

```

16:32:26.628209 BSSID:ff:ff:ff:ff:ff:ff DA:ff:ff:ff:ff:ff:ff SA:50:ea:d6:aa:bb:cc
Probe Request (SUBWAY) [1.0 2.0 5.5 11.0 Mbit]
    
```

Рис. 2. Фрагмент пакету probe request

Таким чином ми отримали дані, з якими будемо далі працювати.

Існує чимало мереж зі розповсюдженими іменами, але в більшості будинків мережі будуть мати створені імена: модель роутера, провайдер та.ін.; або імена задані користувачем. Здавалося б що ця інформація нічого не дасть нам крім здогадок про місце роботи, провайдера. Але є такий ресурс як Wigle.

Wigle - це веб-сайт для збору інформації про різні точки доступу Wi-Fi по всьому світу. Користувачі можуть зареєструватися на сайті і завантажити дані точок доступу, такі як GPS-координати, SSID, MAC-адресу та тип шифрування, використані у виявлених хот-спотах.

Це сервіс, що працює під девізом «Всі мережі, які знаходять всі люди». І більшість міських мереж дійсно можна знайти в цьому сервісі. Більше того, що мережі, котрі цікавлять вас, ви можете знайти пошуком по їх назві. Саме так ви отримаєте інформацію про необхідні мережі за їх іменами. Можна зробити деякі припущення. наприклад, якщо Wigle повертає більше 3-4 мереж з однаковими іменами - це, швидше за все, якісь стандартні мережі, які можна ігнорувати, якщо тільки одна з них не знаходиться близько до тих унікальних, що ми знайшли. Можна відфільтрувати ті мережі, які не були видні більше року, якщо тільки вони не унікальні і не переміщалися в часі – інакше це буде означати, що точка доступу була переміщена.

Інформація про першу точку доступу була завантажена на Wigle у вересні 2001 року, а до серпня 2013 року у базі даних Wigle нараховувалось більше 107 млн. записів Wi-Fi мереж, з яких 105 млн. були записані із GPS координатами і зареєстровано понад 2 млрд. унікальних спостережень.

Але наше завдання зворотне – відштовхуючись від інформації отриманої з перехопленого пакету визначити географічне розташування мережі Wi-Fi.



Рис. 3. Фрагмент карти Wi-Fi мереж м. Хмельницького

**Висновки.** Основною відмінністю та перевагою даного методу є відносна простота реалізації, і можливість отримання всієї необхідної інформації без контакту з досліджуванним пристроєм. Це дозволить використовувати його в умовах конфіденційності, що буде корисним для певних державних та приватних силових структур, і комерційних установ, які прагнуть дослідити переміщення своїх співробітників.

Поставлені основні задачі для реалізації описаного методу, проаналізовано можливі шляхи їх вирішення, та обрані найдоступніші та найефективніші з них. Повністю описана послідовність вирішення поставлених задач, та реалізації методу вцілому.

Запропонований підхід дозволить швидко отримати важливу інформацію без контакту з пристроєм і додаткових дозволів.

Література

1. Wi-Fi. (Вікіпедія — вільна енциклопедія) [Електронний ресурс]. – Режим доступу до статті: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Захист\\_у\\_мережах\\_Wi-Fi](https://uk.wikipedia.org/wiki/Захист_у_мережах_Wi-Fi).
2. Джон Росс. Wi-Fi. Беспроводная сеть / Джон Росс ; пер. с англ. В. А. Ветлужских. – Москва: НТ Пресс, 2007. – 320 с.
3. Захист у мережах Wi-Fi. (Вікіпедія — вільна енциклопедія) [Електронний ресурс]. – Режим доступу до статті: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Захист\\_у\\_мережах\\_Wi-Fi](https://uk.wikipedia.org/wiki/Захист_у_мережах_Wi-Fi).
4. Щербаков А. К. Wi-Fi: Все, что Вы хотели знать, но боялись спросить / Щербаков А. К.; - Москва: ЛА «Бук-Пресс», 2005. - 352 с.
5. Wi-фу: «боевые» приемы взлома и защиты беспроводных сетей / А. А. Владимиров, К. В. Гавриленко, А. А. Михайловский; пер. с англ. АА. Слинкина. — М.: НТ Пресс, 2005. — 463, с

References

1. Wi-Fi. (Wikipedia - the free encyclopedia) [Electronic resource]. – Режим доступу до статті: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Захист\\_у\\_мережах\\_Wi-Fi](https://uk.wikipedia.org/wiki/Захист_у_мережах_Wi-Fi).
2. Dzhon Ross. Wi-Fi. Besprovodnaia set / Dzhon Ross ; per. s anh. V. A. Vetluzhskykh. – Moskva: NT Press, 2007. – 320 p.
3. Zakhyst u merezhakh Wi-Fi. (Wikipedia - the free encyclopedia) [Electronic resource]. – Режим доступу до статті: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Захист\\_у\\_мережах\\_Wi-Fi](https://uk.wikipedia.org/wiki/Захист_у_мережах_Wi-Fi)
4. Shcherbakov A. K. Wi-Fi: Vse, chto Vy khotely znat, no boialys sprosyit / Shcherbakov A. K.; - Moskva: LA «Buk-Press», 2005. - 352 p.
5. Wi-fu: “boevye” pryemy vzloma y zashchyty besprovodnykh setei / A. A. Vladymyrov, K. V. Navrylenko, A. A. Mykhailovskiy; per. s anh. A. A. Slynkyna. - M.: NT Press, 2005. - 463, p.

Рецензія/Peer review : 6.11.2015 р.

Надрукована/Printed :19.12.2015 р.

УДК 004.925.4

С.И. ВЯТКИН

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

А.Н. РОМАНИЮК, А.А. ДУДНИК

Винницкий национальный технический университет, Украина

**АНИЗОТРОПНАЯ ФИЛЬТРАЦИИ ТЕКСТУРЫ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

*Предлагается метод анизотропной фильтрации в режиме реального времени. Как более качественная альтернатива трилинейной фильтрации представлен метод приближения эллипса с большим эксцентриситетом несколькими эллипсами с меньшими эксцентриситетами для высокой степени анизотропии.*

*Ключевые слова: текстурирования, анизотропная фильтрация, фильтрация текстур.*

S.I. VYATKIN

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia

O.N. ROMANYUK, O.O. DUDNYK

Vinnitsa National Technical University, Ukraine

**THE METHOD OF ANISOTROPIC TEXTURE FILTERING IN REAL TIME**

*A method of anisotropic filtering in real time. As a higher quality alternative to tri-linear filtering approximation method presented an ellipse with an eccentricity of several large ellipses with eccentricities less for a high degree of anisotropy.*

*Keywords: texturing, anisotropic filtering, texture filtering*

**Введение**

Применяемые в трехмерной графике методы наложения текстур, используются для визуализации трехмерных сцен с высокой степенью детализации. Генерация текстуры заключается в проецировании изображения на трехмерную поверхность, таким образом, обеспечивается дополнительная детализация объекта без усложнения его геометрии. При этом появляется множество разнообразных ошибок визуализации, называемых артефактами [1]. Было разработано множество различных методов, которые уменьшают количество подобных артефактов визуализации. Для имитации реалистичных сцен необходимо использовать большое количество детализированных текстур.

Поточечная выборка - самый простой метод определения цвета пикселя на основе текстурного изображения. Выбирается тексель, ближе всех расположенный к центру светового пятна. Вследствие того, что цвет пикселя определяют несколько текселей, а выбирается только один, происходит ошибка. Кроме того, форма светового пятна может измениться в зависимости от наклона грани по отношению к наблюдателю [2].

Главное преимущество данного метода фильтрации - это низкие требования к ширине полосы пропускания памяти, т.к. для определения цвета пикселя, нужно выбрать всего лишь один тексель из текстурной памяти. Главный недостаток - ухудшение качества изображений при приближении полигона к точке наблюдения, когда количество пикселей становится больше количества текселей. Кроме того,

необходимо устранять артефакты неправильного расчета глубины сцены.

Билинейная фильтрация использует интерполяционную технику. Для определения текстелей, которые должны быть задействованы при интерполяции, используется форма светового пятна в виде круга. Круг аппроксимируется четырьмя текстелями. Этот метод фильтрации эффективнее поточечной выборки, поскольку частично учитывает форму светового пятна и использует интерполяцию. Так, если полигон приближается слишком близко к точке наблюдения, то для интерполяции потребуется больше текстелей, чем в действительности доступно.

Главный недостаток билинейной фильтрации заключается в том, что аппроксимация выполняется корректно только для полигонов, которые расположены параллельно экрану или точке наблюдения. Если полигон развернут под углом, то получается неправильная аппроксимация, так как необходимо аппроксимировать эллипс, а не круг. При билинейной фильтрации требуется считывать по четыре текстеля из текстурной памяти для определения цвета каждого выводимого на экран пикселя, а это значит, что требования к ширине полосы пропускания памяти увеличиваются в четыре раза, по сравнению с поточечной выборкой. Существует класс артефактов визуализации, появляющихся в результате наложения текстур, так называемый "depth aliasing" (другое название Z-aliasing), которые билинейная фильтрация не может устранить. Ошибки определения глубины сцены возникают оттого, что при удалении от точки наблюдения, текстурное изображение, наложенное на уменьшившийся в размерах объект, становится все более и более сжатым. Эти ошибки визуализации особенно проявляются при анимации, когда время движения видны мерцания и эффект медленного движения в той части изображения, которая должна быть неподвижной.

Для устранения артефактов "depth aliasing" и использовании того факта, что объекты на расстоянии выглядят менее детализованными, чем те, что находятся ближе к точке наблюдения, применяется техника, известная как mip-mapping [3]. Mip-mapping - это метод наложения текстур, имеющих разную степень или уровень детализации, в котором выбирается текстура с необходимой детализацией в зависимости от расстояния до точки наблюдения. Mip-Map текстура состоит из набора заранее отфильтрованных и масштабированных изображений. Каждый пиксель представляется в виде среднего от четырех пикселей из предыдущего уровня с более высоким разрешением. Поэтому изображение, связанное с каждым уровнем текстуры в четыре раза меньше по размеру предыдущего mip-map уровня.

Уровень детализации - Level of Detail (LOD), используются для определения, какой mip-map уровень (или какую степень детализации) следует выбрать для наложения текстуры на объект. LOD должен соответствовать числу текстелей накладываемых на пиксель, то есть, какое количество элементов текстуры должно быть наложено на элемент, выводимого на экран изображения. Например, если текстурирование происходит с соотношением близким к 1:1, то LOD будет 0, а значит, и будет использоваться mip-map уровень с самым высоким разрешением. Если четыре текстеля накладываются на один пиксель, то LOD будет 1, и будет использоваться следующий mip-map уровень с меньшим разрешением.

Если для каждого пикселя в треугольнике вычисляется значение LOD для определения того, какая mip-map текстура имеет нужный уровень фильтрации, то в результате предотвращается появление ошибок визуализации и излишней размытости. LOD должен вычисляться для каждого пикселя в треугольнике с целью избежания разрывов по краям треугольников. Этот метод называется per-pixel mip-mapping (попиксельное mip-текстурирование). Если LOD вычисляется всего лишь раз для всего треугольника, то следствием использование этого значения для всех пикселей треугольника становится появление эффекта размытости, когда некоторые треугольники, из которых состоит анимированный объект, становятся размытыми и с неровностями. Этот менее эффективный метод mip-map текстурирования известен как "per-polygon mip-mapping" (т.е. mip-текстурирование для полигона).

При удалении объекта от точки наблюдения, происходит переход от низкого mip-map уровня, соответствующего изображению с высокой детализацией, к высокому mip-map уровню, соответствующего изображению с высокой степенью фильтрации и низкой детализацией. В момент нахождения объекта в переходном состоянии от одного mip-map уровня к другому, появляется особый тип ошибок визуализации, известных под названием "mip-banding" - полосатость или слоеность, когда появляются различные границы перехода от одного mip-map уровня к другому. "Mip-banding" происходит, когда значение LOD округляется до целого и только один соответствующий уровень текстуры используется для генерации пикселя. После перехода LOD к более высокому уровню, соседние пиксели будут обрабатываться с различными уровнями, и будут иметь различное количество примененных к ним фильтров. Результатом будет появление линии или нескольких линий, проходящих через треугольник в местах, где происходит переход между уровнями. Это один из недостатков использования только билинейного или поточечного mip-текстурирования. Особенно такие артефакты заметны при анимации, потому-что человеческий глаз очень чувствителен к смещениям и может легко заметить место резкого перехода между уровнями фильтрации при движении объекта.

Трилинейная фильтрация включает mip-текстурирование и билинейную интерполяцию. Билинейная интерполяция осуществляется на двух mip уровнях, в результате вычисляются два текстеля, по одному для каждого mip уровня. Цвет пикселя определяется в результате интерполяции по цветам двух mip-текстур. Таким образом, mip уровни представляют собой заранее рассчитанные более детализованные версии исходной текстуры, поэтому получается более хорошая аппроксимация текстелей, расположенных в световом пятне.

Эта техника обеспечивает лучшую фильтрацию. Однако требования к ширине полосы пропускания памяти удваиваются, по сравнению с билинейной фильтрацией, так как необходимо считывать восемь текстелей из текстурной памяти. Использование метода mip-map текстурирования обеспечивает лучшую аппроксимацию (используется большее число текстелей, расположенных в световом пятне) по всем текстелям в световом пятне, благодаря использованию заранее рассчитанных mip-текстур.

При использовании трилинейной фильтрации возможен вывод на экран текстурированного объекта с плавно выполненными переходами от одного mip уровня к следующему, что достигается за счет определения LOD путем интерполяции двух соседних mip-map уровней. Таким образом, решается большинство проблем, связанных с mip-текстурированием и ошибками из-за неправильного расчета глубины сцены ("depth aliasing").

Чтобы добиться лучшего качества, необходимо использовать все текстели, покрываемые световым пятном и усреднять их значение. Однако это сильно влияет на пропускную способность памяти - ее может не хватить, и выполнить такую выборку с усреднением нетривиальная задача. Можно использовать разнообразные фильтры для аппроксимации формы светового пятна в виде эллипса для нескольких возможных углов положения полигона относительно точки зрения. Существуют техники фильтрации, которые используют от 16 до 32 текстелей из текстуры для определения цвета пикселя. Правда использование подобной техники фильтрации требует существенно большей ширины полосы пропускания памяти, а это почти всегда невозможно в существующих системах визуализации без применения дорогостоящих архитектур памяти. В системах визуализации, использующих тайлы [4, 5], существенно экономятся ресурсы полосы пропускания памяти, что позволяет использовать анизотропную фильтрацию. Визуализация с применением анизотропной фильтрации обеспечивает лучшее качество изображения, за счет лучшей глубины детализации и более точного представления текстур, наложенных на полигоны, которые расположены не параллельно экрану или точке наблюдения [6].

В данной работе предлагается метод анизотропной фильтрации в режиме реального времени на графическом акселераторе.

#### Описание метода

Основная идея метода это приближение эллипса с большим эксцентриситетом несколькими эллипсами с меньшими эксцентриситетами. Таким образом, можно преодолеть ограничения, наложенные аппаратными средствами и обеспечить фильтрацию лучшим фильтром с высокой степенью анизотропии.

Эксцентриситет — числовая характеристика конического сечения, показывающая степень его отклонения от окружности. Обычно обозначается "e".

Все невырожденные конические сечения, кроме окружности, можно описать следующим способом:

Выберем на плоскости точку F и прямую d и зададим вещественное число  $e > 0$ . Тогда геометрическое место точек M, для которых отношение расстояний до точки F и до прямой d равно e раз, является коническим сечением. То есть, если M' есть проекция M на d, то

$$FM = e \parallel MM' \parallel$$

Эксцентриситет инвариантен относительно движений плоскости и преобразований подобия.

Поместим эллипсы с меньшими эксцентриситетами в линию вдоль главной оси эллипса (рис. 1). Длина линии L и число эллипсов  $N_e$  вычисляется следующим образом

$$N_e = 2 \left( \frac{R_{maj}}{\alpha R_{min}} \right) - 1$$

$$L = 2(R_{maj} - \alpha R_{min})$$

где  $\alpha$  - степень анизотропии. Для простоты рассматриваем нечетное число эллипсов. Эллипсы располагаются вокруг точки  $(u_m, v_m)$  фильтра, следующим образом

$$g = a \tan\left(\frac{B}{A-C}\right) / 2$$

$$du = \cos(g) \frac{L}{N_e - 1}$$

$$dv = \sin(g) \frac{L}{N_e - 1}$$

$$(u_n, v_n) = (u_m, v_m) + \frac{n}{2} (du, dv), \quad n = 0, \pm 2, \pm 4, \dots$$

где  $(u_n, v_n)$  - положение n-ого эллипса. Чтобы лучше соответствовать форме фильтра EWA, эллипсы взвешены пропорционально их расстоянию от центра следа, согласно функции Гаусса.

Несколько эллипсов приближают анизотропную область с максимальной анизотропией  $N$ . Чтобы лучше покрыть область эллиптического фильтра, увеличиваем число эллипсов в зависимости от желаемого качества. Использование адаптивного числа эллипсов создает нерегулярную рабочую нагрузку за пиксель для графического планировщика аппаратных средств, и этого лучше избегать. Определение количества эллипсов с постоянным числом обеспечивает лучшую производительность. В тестах использовались от трех до семи эллипсов на аппаратных средствах NVIDIA.

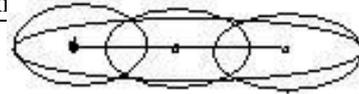


Рис. 1. Аппроксимация эллипса с высоким эксцентриситетом несколькими эллипсами с меньшими эксцентриситетами

Больше чем пять эллипсов не понадобилось, так как в ходе исследований не было зафиксировано никакое существенное улучшение в качестве изображения.

Если эллипсы превысят степени эллипса с большим эксцентриситетом, например, размещая их вне половины длины центральной линии в каждом направлении, то тогда произойдет смаз (размывание). Метод всегда избегает этого случая. Если эллипсы не покроют эллипс с большим эксцентриситетом, то произойдет алиайзинг. Для крайних случаев, максимальное количество эллипсов ограничено. Метод всегда обеспечивает лучшее качество по сравнению с фильтрацией текстуры, реализованной в аппаратных средствах.

При тестировании использовался гауссовский фильтр с отклонением 0.5 и шириной в один пиксель. Настройка отклонения фильтра влияет на точность или гладкость изображения. Меньшее отклонение создает более резкое изображение, но может привести к алиайзингу, когда используется текстура с высокочастотными компонентами. В тестах найдено, что отклонение 0.5 дает хороший компромисс между предотвращением алиайзинга и смазом изображения.

На рисунках 2 и 3 показаны изображения с трилинейной интерполяцией текстуры и анизотропной фильтрацией.

Тестирование метода проводилось на Intel Core2 CPU E8400 3.0 GHz и 470 GTX с разрешением 1024x768. Измерялись как перцепционная метрика, так и среднеквадратическая ошибка.

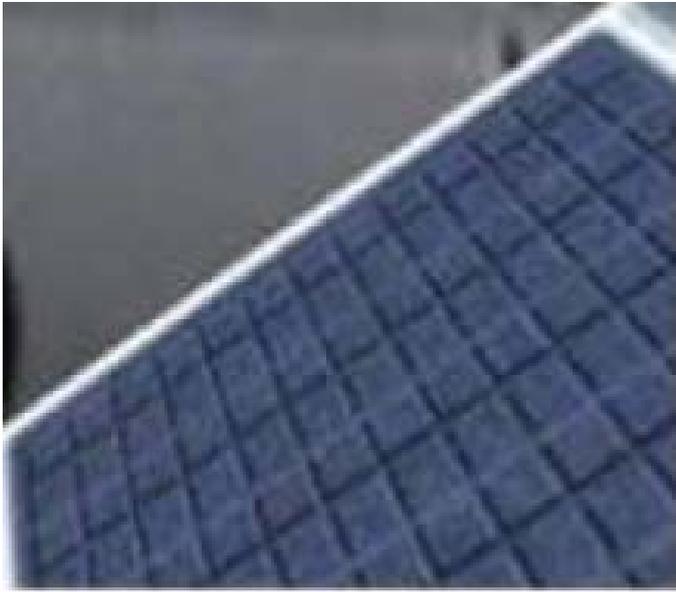


Рис. 2. Изображение с трилинейной интерполяцией текстуры



Рис. 3. Изображение с анизотропной фильтрацией текстуры

### Заключение

Трилинейная фильтрация была раньше недоступна, большинство приложений использовали билинейную фильтрацию для обеспечения минимального качества изображения. Затем поддержка трилинейной фильтрации стала стандартной функцией графических акселераторов, так как она обеспечивает вывод трехмерного изображения с высоким качеством при наличии некоторого количества артефактов визуализации. Метод анизотропной фильтрации текстуры, представленный в данной работе, обеспечивает еще лучшее качество изображения.

Эллиптический средневзвешенный фильтр допускает перекрывающиеся круглые пиксели, отображающиеся в произвольно ориентированные эллипсы на текстуре. Фильтрующая функция задается в виде таблицы просмотра. Вместо отображения текселя на экран фильтр отображается на текстурное пространство. Его форма, являющаяся в экранном пространстве центрально симметричной функцией, отображается в эллипс текстуры с помощью функции эллиптического параболоида. Этот параболоид вычисляется по шагам и используется как для проверки включения эллипса, так и для задания таблицы фильтрации. Эллиптический средневзвешенный фильтр позволяет с большой точностью обрабатывать

вытянутые вертикальные или горизонтальные области с меньшими размываниями по контуру и у горизонта, а также диагонально-ориентированные области.

### Литература

1. Вяткин С.И., Романюк О.В., Мельник А.В. Антиалийзинг текстур // V International Conference on Optoelectronic Information Technologies «PHOTONICS-ODS 2010» (Ukraine, Vinnytsia, VNTU, September 28–30, 2010). С. 82–83.
2. Вяткин С.И., Романюк О.Н., Кришук С.О. Метод вычисления текстурных координат для отображения текстуры на плоские полигоны //Международный научно-технический журнал «Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах», 2012, Хмельницкий национальный университет, Хмельницкий, Украина, 2012, № 2. С. 86–89.
3. Вяткин С.И., Романюк О.В. Вычисление текстуры с префильтрацией для рендеринга полигонов в реальном времени // Материалы IV Международной научно-технической конференции "Моделирование и компьютерная графика" (г. Донецк, Украина, Дон НТУ, 5--8 октября 2011). С. 47-50.
4. Вяткин С.И., Романюк А.Н., Довгалюк Р.Ю. Особенности текстурирования в тайловой технологии визуализации // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия «Информатика, кибернетика и вычислительная техника», 2012, Донецк: ДонНТУ, вып. 15 (203). С. 79–82.
5. Вяткин С.И., Романюк О.В., Стахов А.А. Формирование реалистических изображений с использованием пошагового вычисления текселей // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований», 2011, т. 3, Технические науки, Одесса. Изд.: Черноморье. С. 65–69.
6. McCormack, J., Perry, R., Farkas, K. I., and Jouppe, N. P. Feline: fast elliptical lines for anisotropic texture mapping. In SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 243–250. 1999

### References

1. Vyatky'n S.I., Romanyuk O.V., Mel'ny'k A.V. Anty'aly'ajzy'ng tekstur // V International Conference on Optoelectronic Information Technologies «PHOTONICS-ODS 2010» (Ukraine, Vinnytsia, VNTU, September 28–30, 2010). S. 82–83.
2. Vyatky'n S.I., Romanyuk O.N., Kry'shhuk S.O. Metod vychy'sleny'ya teksturny'kh koordy'nat dlya otobrazheny'ya tekstury na plosky'e poly'gony //Mezhdunarodny'j nauchno-tekhn'y'chesky'j zhurnal «Y'zmerel'naya y' vychy'sly'tel'naya tekhn'y'ka v technology'chesky'x processax», 2012, Xmel'ny'czky'j nacy'onal'ny'j uny'versy'tet, Xmel'ny'czky'j, Ukray'na, 2012, # 2. S. 86–89.
3. Vyatky'n S.I., Romanyuk O.V. Vychy'sleny'e tekstury s predfy'l'tracy'ej dlya rendery'nga poly'gonov v real'nom vremeny' // Matery'aly IV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhn'y'cheskoj konferency'y' "Modely'rovany'e y' komp'yuternaya grafy'ka" (g. Doneczk, Ukray'na, Don NTU, 5--8 oktyabrya 2011). S. 47-50.
4. Vyatky'n S.I., Romanyuk A.N., Dovgalyuk R.Yu. Osobennosty' tekstury'rovany'ya v tajlovoj technology'y' vy'zualy'zacy'y' // Nauchnye trudy Doneczkogo nacy'onal'nogo tekhn'y'cheskogo uny'versy'teta. Sery'ya «Y'nformaty'ka, ky'bernety'ka y' vychy'sly'tel'naya tekhn'y'ka», 2012, Doneczk: DonNTU, вып. 15 (203). S. 79–82.
5. Vyatky'n S.I., Romanyuk O.V., Staxov A.A. Formy'rovany'e realy'sty'chesky'x y'zobrazheny'j s y'spol'zovany'em poshagovogo vychy'sleny'ya tekselej // Sborny'k nauchny'kh trudov po matery'alam mezhdunarodnoj nauchno-prakty'cheskoj konferency'y' «Sovremennye napravleny'ya teorety'chesky'x y' pry'kladny'x y'ssledovany'j», 2011, t. 3, Tekhn'y'chesky'e nauky', Odessa. Y'zd.: Chernomor'e. S. 65–69.
6. McCormack, J., Perry, R., Farkas, K. I., and Jouppe, N. P. Feline: fast elliptical lines for anisotropic texture mapping. In SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 243–250. 1999

Рецензія/Peer review : 18.11.2015 р.

Надрукована/Printed :20.12.2015 р.

## МАСШТАБУВАННЯ ХМАРНОГО ДОДАТКУ З ВИКОРИСТАННЯМ СИМУЛЯТОРА НАВАНТАЖЕННЯ ЙОГО РОБОТИ

*У статті визначено основні вимоги до можливостей симулятора хмарного додатку, що використовується для порівняння ефективності стратегій масштабування: можливість для будь якого моменту симуляції визначити завантаженість процесора та пам'яті хмарного додатку, а також оцінити час операції масштабування. Розроблено симулятор, що відповідає сформованим вимогам та проведено його тестування.*

*Ключові слова: хмарні обчислення, масштабування хмарного додатку, симуляція роботи хмарного додатку.*

TAMARA SAVCHUK, ANDRIY KOZACHUK  
Vinnytsia National Technical University, Ukraine

### SCALING OF A CLOUD APPLICATION WITH USAGE OF WORKLOAD EMULATOR

*The article describes main requirements to cloud application emulator that is used for comparison of scaling strategies efficiency: ability to obtain CPU and memory load for any moment of simulation and ability to estimate scaling time. Emulator that meets described requirements was developed and tested.*

*Keywords: cloud computing, cloud application scaling, emulation of a cloud application.*

#### Вступ

Порівняння роботи стратегій масштабування хмарного додатку та визначення ефективності її роботи можуть бути проведені лише за умови можливості забезпечення однакових умов тестування кожної зі стратегій масштабування [1]. Такі умови можуть бути забезпечені за допомогою систем навантажувального тестування веб-сайтів[2, 3], що дозволяють виявити випадки некоректної роботи хмарного додатку при проходженні піків навантаження, проте для них характерна висока вартість експлуатації, також вони можуть потребувати спеціального обладнання для генерації запитів до хмарного додатку. Крім того, процес навантажувального тестування займає тривалий проміжок часу – виконання одного тесту може складати декілька годин. Цей факт обмежує швидкість проведення експериментів по визначенню ефективності роботи хмарного додатку, та робить актуальним використання симулятора його роботи під навантаженням, що дає можливість підвищити швидкість та зменшити вартість проведення експериментів за рахунок використання моделі інфраструктури хмарного додатку.

#### Аналіз існуючих рішень

Симуляція роботи хмарного додатку з метою визначення його швидкодії може бути проведена з використанням таких поширених систем як TPC-W, RUBiS і CloudStone [4 - 6]. Система TPC-W розроблена організацією TPC, яка спеціалізується на засобах оцінки швидкодії баз даних. Система TPC-W підтримує такі профілі використання: купівля товарів в інтернет-магазинах, замовлення товарів та перегляд сторінок. Основною метрикою оцінювання роботи хмарного додатку є кількість дій користувача за секунду. Система RUBiS розроблена для моделювання роботи інтернет-аукціонів. Вона може відтворювати такі типові для аукціонів сценарії поведінки як продаж, огляд товару, створення ставки та підтримує три типи сесій користувача: покупець, відвідувач, продавець. Система базується на трьох основних компонентах: балансувач навантаження Apache, сервер Jboss та база даних MySQL. Система CloudStone – багатомовний та мультиплатформений інструмент, розроблений в університеті Берклі. Система включає генератор реалістичних профілів навантаження на основі Марковських ланцюгів. Оцінювання швидкодії хмарного додатку відбувається на основі даних інструменту Olio, який здійснює вимірювання ефективності роботи клієнтської і серверної частини хмарного додатку.

Усі описані системи не дозволяють оцінювати значення метрик роботи хмарного додатку, тому вони не здатні забезпечити необхідні дані для порівняння ефективності стратегій масштабування хмарного додатку.

#### Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єктом дослідження є процес симуляції роботи хмарного додатку з періодичними операціями масштабування.

Мета дослідження – розробка засобу симуляції роботи хмарного додатку та отримання значень основних функціональних характеристик його роботи, що дозволить зменшити час оцінювання стратегій масштабування хмарного додатку та скоротити час прийняття рішень щодо масштабування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Визначити вимоги до роботи симулятора хмарного додатку з підтримкою операції масштабування.
2. Розробити симулятор роботи хмарного додатку.

#### Формування вимог до симулятора роботи хмарного додатку

Для визначення ефективності роботи певної стратегії масштабування хмарного додатку і

порівняння її ефективності з іншими стратегіями необхідно здійснити збір статистики функціонування хмарного додатку в контрольованих умовах, які можуть бути відтворені. Такі умови можуть бути забезпечені однією з систем тестування веб-сайтів під навантаженням [7-9]. Дані системи дозволяють виявити випадки некоректної роботи хмарного додатку за умов пікових навантажень. Недоліком таких систем є висока вартість їх експлуатації та наявність спеціального обладнання, що генерує запити до хмарного додатку.

Симулятор роботи хмарного додатку повинен максимально точно моделювати роботу хмарного додатку під навантаженням, враховуючи такі характеристики як тривалість та успішність виконання мережевих запитів і час, необхідний для здійснення масштабування хмарного додатку. Також, симулятор повинен мати можливість перевірки існуючих технологій масштабування хмарного додатку з внесенням мінімальної кількості змін в останні та забезпечувати можливість зручного збору інформації про стан хмарного додатку під час проведення тестування. Для повторного проведення навантажувальних тестів симулятор повинен надавати можливість завантажувати програми тесту зі спеціально відформатованого файлу.

Для взаємодії з інформаційною технологією масштабування симулятор повинен включати функцію відтворення команд масштабування хмарного додатку, що підтримуються хостингом. При чому формат команди масштабування та можливі стани інфраструктури хмарного додатку повинні співпадати з такими у реального провайдера хмарного хостинга, це може бути досягнуто шляхом створення окремих симуляторів для кожного провайдера та забезпеченням широких можливостей налаштування симулятора. Робота симулятора хмарного додатку повинна найбільш повною мірою відтворювати реальне середовище, тому необхідно надати можливість налаштування роботи симулятора на основі статистики функціонування роботи реального хмарного додатку.

Враховуючи визначені вище особливості оцінювання ефективності функціонування хмарного додатку, симулятор роботи хмарного додатку повинен відповідати наступним вимогам:

- підтримка операцій масштабування аналогічних тим, що забезпечуються провайдером хмарного хостинга;
- симуляції тривалості виконання мережевих запитів та генерації помилок про недоступність додатку;
- симуляція завантаженості оперативної пам'яті та процесора;
- підтримка тестів навантаження, описаних з використанням уніфікованого формату;
- симуляція тривалості виконання масштабування хмарного додатку;
- можливість легкого доступу до історії стану інфраструктури хмарного додатку під час моделювання;
- можливість налаштування роботи симулятора на основі статистики використання реального хмарного додатку.

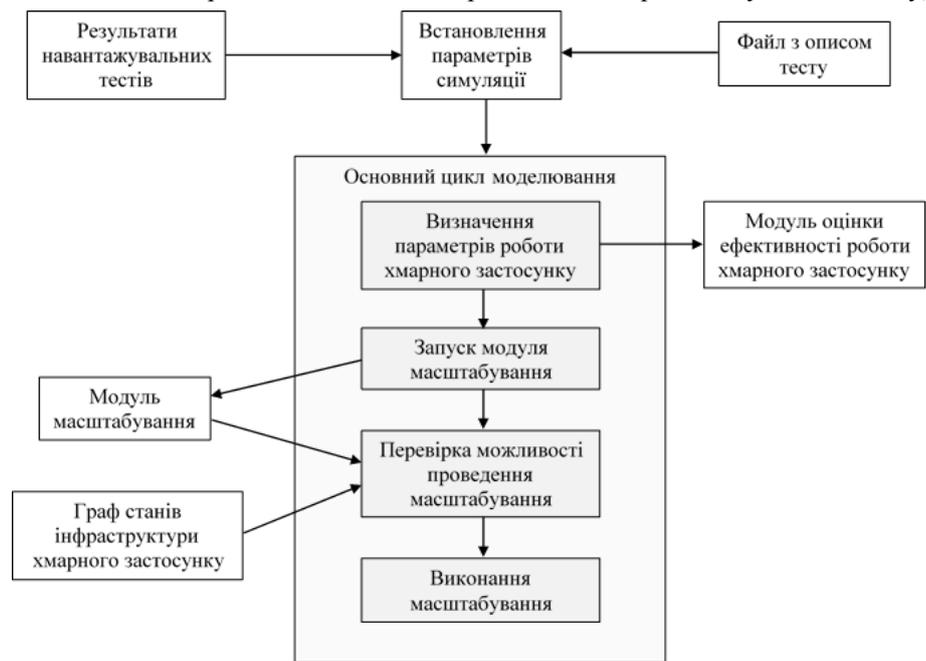


Рис.1. Взаємодія компонентів симулятора роботи хмарного додатку

### Розробка симулятора роботи хмарного додатку

На основі сформованих вимог може бути визначена архітектура симулятора роботи хмарного додатку: симулятор повинен включати у себе модулі зчитування інформації, що описує профіль теста навантаження, визначення параметрів роботи хмарного додатку, взаємодії з модулем масштабування хмарного додатку, що тестується, перевірки та застосування результатів роботи модуля масштабування, налаштування внутрішніх параметрів на основі даних навантажувальних тестів. Взаємодія компонентів симулятора роботи хмарного додатку між собою та із зовнішнім середовищем показана на рисунку 1.

Отже, розробка симулятора роботи хмарного додатку дозволить пришвидшити та здешевити проведення порівняння ефективності використання різних методів моделювання хмарного додатку. Пришвидшення проведення експериментів досягається за рахунок того, що модельний час симулятора проходить значно швидше за реальний час. Зменшення вартості виконання експериментів відбувається завдяки можливості відмовитись від спеціального обладнання для проведення тестів і використання платних сервісів навантажувального тестування.

Для побудови симулятора роботи хмарного додатку було проведено ряд навантажувальних тестів за допомогою середовища Visual Studio Online [10]. Тести імітували паралельний доступ до хмарного додатку автоматизованого проведення мозкових штурмів BrainTank [11] від 20 до 1500 користувачів при різних обчислювальних потужностях, виділених для роботи хмарного додатку. В результаті проведення навантажувальних тестів була знята телеметрія характеристик роботи хмарного додатку, а саме: кількість вхідних мережевих запитів, середній час обробки запиту, кількість серверних помилок за хвилину, виділений процесорний час та оперативна пам'ять. Телеметрія збиралася за допомогою порталу Microsoft Azure та вбудованих у Visual Studio звітів тестів навантаження. Приклад зібраної телеметрії зі звітів навантажувальних тестів для хмарного додатку, що розміщується на одній віртуальній машині наведено в таблиці 1.

На основі отриманих даних для різних варіантів конфігурації серверної інфраструктури хмарного додатку шляхом поліноміальної апроксимації була отримана функціональна залежність часу виконання мережевого запиту від кількості вхідних мережевих запитів. Аналогічним чином розраховується значення завантаженості процесора та оперативної пам'яті.

Таблиця 1

Результати виконання навантажувального тесту

Час, с	Кількість користувачів	Сторінок за секунду	Час завантаження сторінки	Запитів за секунду	Час виконання запиту
0:15	250	136,7333	0,7245246	804,8666	0,2411165
0:30	350	187,0667	0,8606557	1169,933	0,2123768
0:45	550	140,9333	2,754967	825,7333	0,5713709
1:00	650	222,6	1,723869	1348,067	0,3886059
1:15	850	148,7333	4,794711	899	0,9529848
1:30	950	223,8	2,948466	1332,933	0,6318396
1:45	1150	136	7,413725	862,6	1,311616
2:00	1250	240,5333	4,060699	1364,4	0,8223884
2:15	1450	124,1333	8,570891	849,3333	1,374804
2:30	1500	194,1333	6,835852	1019,867	1,395673
2:45	1500	165,6	9,371981	1059,667	1,579427
3:00	1500	208,8667	5,985318	1065,8	1,28642

Модельний час, необхідний для проведення масштабування завжди однаковий для заданої пари початкового та кінцевого станів та розраховувався як середнє арифметичне тестових операцій масштабування між цими двома станами.

На основі отриманих співвідношень та вимог було розроблено програму-симулятор роботи хмарного додатку. В якості вхідних даних програма приймає профіль тесту навантаження, реалізацію стратегії масштабування, її налаштування та початкових стан хмарного додатку. Результатом роботи програми є ряд вимірювань ефективності стратегії масштабування хмарного додатку з інтервалом в 1 хвилину. UML-діаграма класів розробленої програми зображена на рисунку 2.

Тести навантаження для симулятора роботи хмарного додатку було побудовано на основі даних чемпіонату світу з футболу [13]. При цьому були виділені тести з рівномірними добовими коливаннями та з піками навантаження змінної інтенсивності.

Таким чином, на основі сформованих вимог і результатів навантажувальних тестів було розроблено симулятор роботи хмарного додатку, що дозволяє пришвидшити процес порівняння стратегій масштабування та дає можливість проведення більшої кількості експериментів.

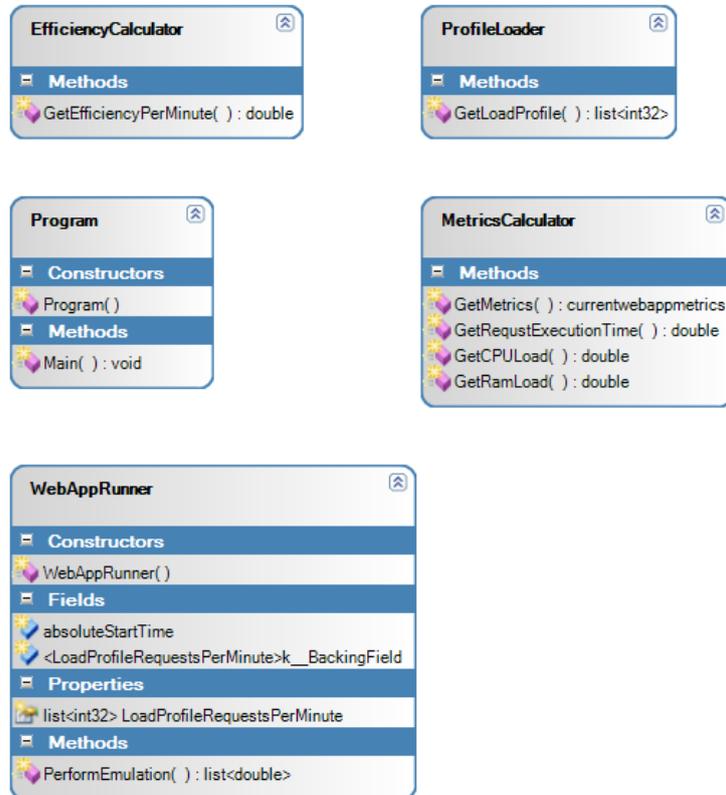


Рис.2. Діаграма класів симулятора роботи хмарного додатку

### Висновки

Таким чином, в результаті проведених досліджень було визначено вимоги до основних функцій симулятора роботи хмарного додатку, оптимізованого для порівняння ефективності стратегій масштабування. Встановлено, що симулятор хмарного додатку повинен підтримувати моделювання завантаженості центрального процесора і пам'яті в залежності від кількості користувачів, а також часу виділення обчислювальних ресурсів.

На основі сформованих вимог розроблено симулятор роботи хмарного додатку, що підтримує розрахунок значень основних функціональних характеристик шляхом інтерполяції результатів тестів навантаження. Розроблений симулятор роботи хмарного додатку надає можливість підвищення швидкодії та зменшення вартості операції порівняння ефективності стратегій масштабування. В якості вхідних даних програма приймає тест навантаження, реалізацію стратегії масштабування, її налаштування та початковий стан хмарного додатку.

Проведене тестування розробленого симулятора показало, що при збільшенні кількості користувачів хмарного додатку час обробки одиничних запитів збільшується, а кількість оброблених запитів за секунду виходить на плато насичення, що відповідає поведінці реальних хмарних додатків під час тестування навантаження.

### Література

1. Савчук Т. О. Автоматизоване прийняття рішень щодо масштабування хмарного застосування [Текст] / Т. О. Савчук, А. В. Козачук // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2015. – № 2. – С. 15–22.
2. Desai, D. Introducing Cloud-based Load Testing with Team Foundation Service [Electronic resource] / D. Desai // Microsoft Corporation. – 3 Jun 2013. – Available at: \www/URL: <http://blogs.msdn.com/b/visualstudioalm/archive/2013/06/03/introducing-cloud-based-load-testing-with-team-foundation-service.aspx>
3. Apache JMeter [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <http://jmeter.apache.org/>. – 19.10.2015.
4. RUBiS: Rice University Bidding System [Electronic resource]. – 2009. – Available at: \www/URL: <http://rubis.ow2.org/>. – 17.11.2015.
5. CloudStone Project by Rad Lab Group [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <http://radlab.cs.berkeley.edu/wiki/Projects/Cloudstone/>. – 13.09.2012.
6. TPC-W [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <http://www.tpc.org/tpcw/default.asp>. – 17.11.2015.
7. Introducing Cloud-based Load Testing with Team Foundation Service [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <http://blogs.msdn.com/b/visualstudioalm/archive/2013/06/03/introducing-cloud-based-load-testing-with-team-foundation-service.aspx>
8. LoadStorm [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <http://loadstorm.com/>
9. BlazeMeter [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <https://blazemeter.com/>
10. Charles Sterling. Load Testing : Load Testing Made Easy with Microsoft Azure and Visual Studio Online. MSDN magazine November 2014 Volume 29 Number 11 <https://msdn.microsoft.com/en-us/magazine/dn818498.aspx?f=255&MSPPErr=-2147217396>
11. Козачук А. В. Система автоматизованого проведення мозкових штурмів "Braintank" // Збірник матеріалів дев'ятої міжнародної конференції "Інтернет-Освіта-Наука-2014". - Вінниця. - 2014.
12. 1998 World Cup Web Site Access Logs [Електронний ресурс] – режим доступу: <http://ita.ee.lbl.gov/html/contrib/WorldCup.html> .

### References

1. Savchuk, T. O., Kozachuk, A. V. (2015). Avtomatyzovane pryiniattia rishen shchodo masshtabuvannia khmarnoho zastosunku. Informatsiini tehnologii ta kompiuterna inzheneriia, 2, 15–22.
2. Desai, D. (2013, Jun 3). Introducing Cloud-based Load Testing with Team Foundation Service. Microsoft Corporation. Available: <http://blogs.msdn.com/b/visualstudioalm/archive/2013/06/03/introducing-cloud-based-load-testing-with-team-foundation-service.aspx>
3. Apache JMeter. Available: <http://jmeter.apache.org/>. Last accessed: 19.10.2015.
4. RUBiS: Rice University Bidding System. (2009). Available: <http://rubis.ow2.org/>. Last accessed: 17.11.2015.
5. CloudStone Project by Rad Lab Group. Available: <http://radlab.cs.berkeley.edu/wiki/Projects/Cloudstone/>. Last accessed: 13.09.2012.
6. TPC-W. Available: <http://www.tpc.org/tpcw/default.asp>. Last accessed: 17.11.2015.
7. Introducing Cloud-based Load Testing with Team Foundation Service [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <http://blogs.msdn.com/b/visualstudioalm/archive/2013/06/03/introducing-cloud-based-load-testing-with-team-foundation-service.aspx>
8. LoadStorm [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <http://loadstorm.com/>
9. BlazeMeter [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <https://blazemeter.com/>
10. Charles Sterling. Load Testing : Load Testing Made Easy with Microsoft Azure and Visual Studio Online. MSDN magazine November 2014 Volume 29 Number 11 <https://msdn.microsoft.com/en-us/magazine/dn818498.aspx?f=255&MSPPErr=-2147217396>
11. Kozachuk, A. (2014). Systema avtomatyzovanoho provedennia mozkovykh shturmiv "Braintank". Proceedings Of The Ninth International Scientific-Practical Conference " IES-2014. New Informational and Computer Technologies in Education and Science". Vinnytsia: VNTU, 321
12. WorldCup98. Available: <http://ita.ee.lbl.gov/html/contrib/WorldCup.html>

## НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ РАДІОСИГНАЛІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЗАСОБІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ З РАДІОКАНАЛАМИ БЕЗПЛОТНИХ РОЗВІДУВАЛЬНИХ СИСТЕМ

*Проект направлено на вирішення важливої прикладної задачі, яка гостро постала в рамках проведення АТО, так і забезпечення захисту від несанкціонованих посягань на інформацію про територію України, шляхом використання безпілотних розвідувальних систем. Вказані засоби використовують два визначаючих принципи – радіокерування, та передачі телеінформації радіоканалами. Наявний парк безпілотних літаючих та рухомих апаратів використовує як класичні, так і сучасні радіозасоби передачі інформації із використанням завадостійких (FFSS, ADT, GSM, CDMA, тощо). Тому, класичні відомі засоби Радіоелектронної боротьби (РЕБ), які є на сучасному рівні, не здатні забезпечити виконання двох принципових і завдань: - подавлення (збій в керуванні траєкторією руху), і саме важливе, блокування передачі телеінформації у реальному масштабі часу, саме для сигнально-кодових конструкцій сигналів, використання ортогонального оброблення та скритності передавання по випадкових каналах «широкосмугового шумоподібного» каналів зв'язку. Пропонується розробки і постановлення на виробництво новітніх РЕБ на основі використання оригінальних принципів фазочастотної теорії вимірювання та перетворення радіосигналів.*

*Ключові слова: засоби радіоелектронної боротьби, безпілотні апарати, використання нових принципів, квантова теорія вимірювальних перетворень*

I.V. TROTSYSHYN, N. I. TROTSYSHYNA

Odessa National Academy of Telecommunications .. Popov

M.I. LYSYY

National Academy of State Border Service of Ukraine. B. Khmelnytsky

## NEWEST TECHNOLOGIES FOR MEASURING CHANGES RADIO SIGNALS CONSTRUCTION OF RADIO ELECTRONIC WARFARE WITH WIRELESS CHANNEL UNMANNED RECONNAISSANCE SYSTEMS

*Abstract - The project is aimed at solving important applied problem that arose in the framework of the ATO, and protect against unauthorized encroachment on the territory of Ukraine about by the use of unmanned reconnaissance systems. These vehicles use two defining principles - radio and transmission teleinformation radio channels. The existing fleet of unmanned flying and mobile devices using both classic and contemporary of radio transmission of information using noiseimmunity (FFSS, ADT, GSM, CDMA, etc.). Therefore, classical known means of electronic warfare (EW), which is up to date, not able to perform two fundamental and objectives: - suppression (failure to manage trajectory), and it is important to block the transfer teleinformation in real time, exactly for The signal-code construction signals using orthogonal processing and transmission of secrecy on random channels "broadband noise-like" channels. It is proposed to develop the production and adoption of advanced electronic warfare on the basis of the original principles of the theory of phase-frequency measurement and signal processing.*

*Keywords: means of electronic warfare, unmanned vehicles, using new principles quantum theory test.*

### Вступ

В сучасному світі все більшу роль починають відігравати безпілотні літальні апарати (БПЛА)[1-4], які мають як позитивну так і негативну сторону використання. І якщо для питань використання для потреб людства, направлених на розвідку та контроль над природними явищами і направлених на пізнання природи та захисту населення, ще більшого поширення набуло використання БПЛА (дрони, квадрокоптери, тощо) саме у військових цілях. Яскравим прикладом є використання таких систем, як професійного та промислового виконання, у військових конфліктах, так і як засобів контрабанди, і самим небезпечним є їх використання у терористичних акціях. І якщо професійні спеціалізовані безпілотники військового призначення (США, Ізраїль, тощо) використовують космічні технології та засоби, то ринок БПЛА загального застосування (як правило Китай), можуть нанести значно більшої «шкоди» і за значно «менші кошти», що створює велику проблему, із якою неспроможні боротися наявні засоби ПВО та РЕБ.

Питання подавлення систем керування та зняття інформації не стояло, так як професійні системи, які використовують супутникові канали, і використовуються в армійських цілях не можуть бути подавлені засобами наземних РЕБ, і протидія можлива лише в рамках систем типу «АВАКС», або блокування супутникових каналів. В той же час висока ефективність використання примітивних (любительських і професійних) систем, особливо в рамках АТО, а також бойових дій, показали повну безпорадність спробам їх подавлення класичними методами «глушіння», так як в самих примітивних безпілотних системах використовуються сучасні радіоканали не лише в діапазоні 400-900МГц, а також і 2,8, і 5,4 ГГц, і при цьому використовуються стійкі до гармонічних завад сучасні методи передачі із системами завадостійких (FFSS, ADT, GSM, CDMA,) тощо.

### Методологічний підхід до систем протидії БПЛА

Перед тим як підійти до формулювання основних принципів побудови систем протидії, розглянемо

парадигму вирішення нестандартних проблемних задач, які можуть знайти нові несподівані рішення, саме в конкретних нетипових для ПВО і РЕБ задачах. Характерним може слугувати причча про «два камінці», коли на завдання яке на перший погляд не має позитивного вирішення, є можливим отримати зовсім не очевидний, і саме головне позитивний результат.

«Два камінчики».

Якось давно жив-був у Лондоні купець, що мав нещастя зайняти більшу суму у лихваря. Коли прийшов термін виплати грошей, лихвар заявив, що простить борг, якщо купець віддасть за нього заміж свою красуню дочку. Батько з дочкою прийшли в жах від такої пропозиції. Тоді підступний лихвар запропонував, щоб все вирішив жереб.

"Давайте, - сказав він, - покладемо в порожній гаманець дві камінчика - чорний і білий, і нехай дівчина витягне один з них. Якщо попадеться чорний камінь, вона стане моєю дружиною, якщо білий - залишиться з батьком. В обох випадках борг буде вважатися погашеним. Якщо ж дівчина відмовиться тягнути жереб, то її батька кинуть в боргову в'язницю, а сама вона стане убогою і помре з голоду". Купець і його дочка були змушені прийняти пропозицію. Розмова відбувалася в саду купця. Лихвар нахилився, щоб підібрати з посипаної гравієм доріжки камінчики. Дівчина, у якої страх загострив зір, помітила, що лихвар поклав у гаманець два чорні каменю. Як же вийти дівчині із ситуації? Пряме мислення підказує три можливі рішення дівчиною виниклої проблеми:

1. Відмовитися витягувати камінчик
2. Оголосити, що в гаманці обидва камінчика чорні, і виставити таким чином лихваря шахраєм.
3. Витягнути камінчик - пожертвувати собою, щоб врятувати батька з в'язниці.

Як Ви розумієте, всі три варіанти вкрай погані, бо якщо дівчина відмовиться тягнути жереб, то її батька кинуть у в'язницю. Якщо ж вона витягне камінчик, тоді їй доведеться вийти заміж за старого потворного лихваря. Дівчина сунула руку в гаманець, витягла камінь і впустила його, ніби ненароком, на доріжку, де той миттєво загубився серед подібних йому камінчиків. - Ах, яка досада, - вигукнула вона. - Ну, та це поправимо. **Ми можемо дізнатися, який камінчик я витягла, за кольором того, який залишився в гаманці.** Оскільки залишився камінчик був, зрозуміло, чорний, то, значить, вона витягла білий, - адже лихвар не міг зізнатися в шахрайстві. **Застосувавши обхідне мислення і винахідництво, дівчина не тільки вийшла з, здавалося б, безвихідного становища, але й менше ризикувала, якби лихвар вів чесну гру.** У цьому випадку у неї були б рівні шанси на те, щоб врятуватися або загинути. А так вона напевно залишилася з батьком і гасила його борг лихвареві. Ось так ось кмітливість і винахідництво допомогли юної леді в житті.

Саме виходячи з таких позицій пропонуються новітні підходи, які на перший погляд не мають нічого спільного із сучасним принципами побудови засобів ПВО і РЕБ.

Першим напрямком направленим на вирішення задачі блокування передачі зображення (саме в реальному часі) може служити використання систем РЕБ із використання властивостей із «прямокутним дискретним спектром», другим, є радикальний підхід направлений на знищення небезпечного БПЛА, але системи повинні бути побідним до ЗУРС, із тією різницею, що використовуються ефективні засоби автономного радіонаведення БПЛА - «камікадзе», які також базуються на властивостях Функції  $\text{sinc}(x)$ .

Головними перевагами новітніх підходів є подолання проблем які існують у відомих системах.

Основними недоліками наявних систем є неефективні (з енергетичної точки зору), формування подавляючих сигналів, відповідно малий радіус дії, та досить висока вартість, що не завжди дозволяє їх використання для боротьби із БПЛА.

Питання протидій в польових умовах бойових дій (АТО), показало високу ефективність навіть примітивних засобів розвідки, і в той же час повну відсутність будь яких методів їх подавлення (окрім знищення вогнем із стрілкової зброї), що призводить до суттєвих наслідків у бойових операціях.

Тому очевидним є необхідним факт розробки мобільних, простих у експлуатації військових операцій, високоефективних систем РЕБ саме із сучасними видами радіозв'язку, який може бути розв'язано лише шляхом використання принципово нових можливостей при вимірюванні та формуванні радіосигналів, які забезпечуються лише в рамках ФЧВ і ПР, і відсутні у «класичній радіотехніці».

### Постановка задачі

Актуальність проблеми особливо гостра в рамках АТО, а також забезпечення обороноздатності, а також може використовуватись для служб МНС, а також гідрометеослужб, засоби яких на основі теорії ФЧВ і ПР не можуть бути використані не санкціоновано, а і подавлені «класичними РЕБ».

Мета. Створення високоефективних мобільних засобів радіоелектронної боротьби із радіоканалами керування та зняття відеоінформації, або і ліквідації сучасних безпілотних розвідувальних систем, шляхом використання принципово нових можливостей які відкриваються в рамках теорії ФЧВ і ПР, і не мають аналогів у світі за своїми комплексним параметром точність  $x$  швидкодія вимірювання (формування) радіосигналів [1-3].

### Теоретична база новітніх підходів

Як, не дивно, але для виявлення переваг нового насамперед потрібно повернутися на вихідні позиції теорії радіосигналів, і розглянути їх особливості виходячи із поставлених задач.

Гармонійні сигнали (або синусоїдальні), описуються наступними формулами:

$$s(t) = A \cdot \sin(2\pi f_0 t + \phi) = A \cdot \sin(\omega_0 t + \phi),$$

$$s(t) = A \cdot \cos(\omega_0 t + \phi),$$

де  $\phi, \varphi_0, \omega_0, f_0$  – постійні величини, які можуть виконувати роль інформаційних параметрів сигналу:  $A$  - амплітуда сигналу,  $f_0$  - циклічна  $\omega_0$  - кутова частота в радіанах.

Період одного коливання  $T = 1 / f_0$ . (Рис.1). Частотний спектр сигналу представлений амплітудним і початковим фазовим значенням частоти  $f_0$  (при  $t = 0$ ).

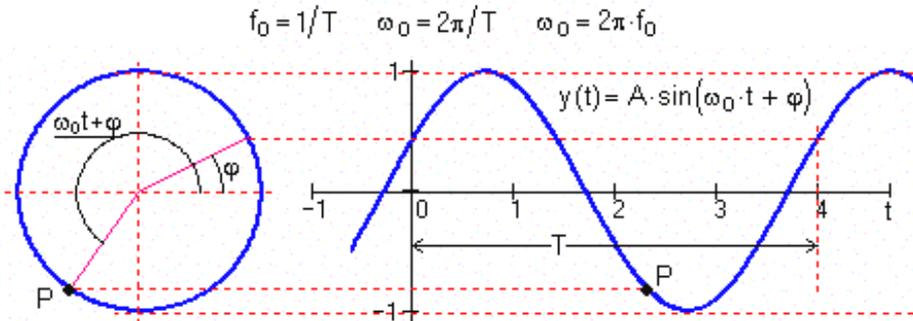


Рис.1. Гармонійні сигнали (або синусоїдальні)

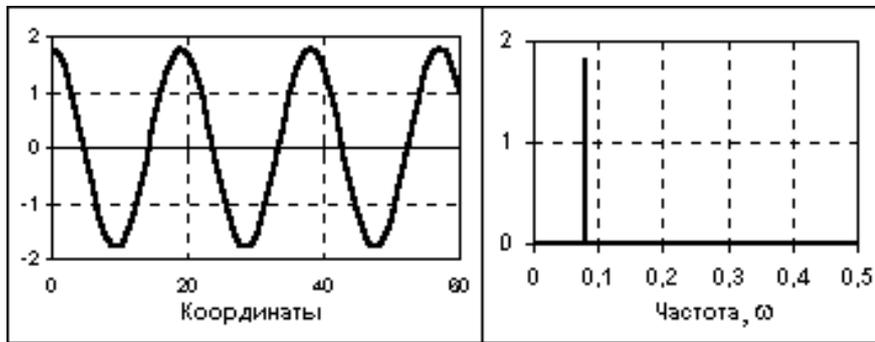


Рис. 2. Частотний спектр сигналу

Для імпульсних сигналів картина утворення спектральних складових ще більш складніша, і має вигляд рис.3.

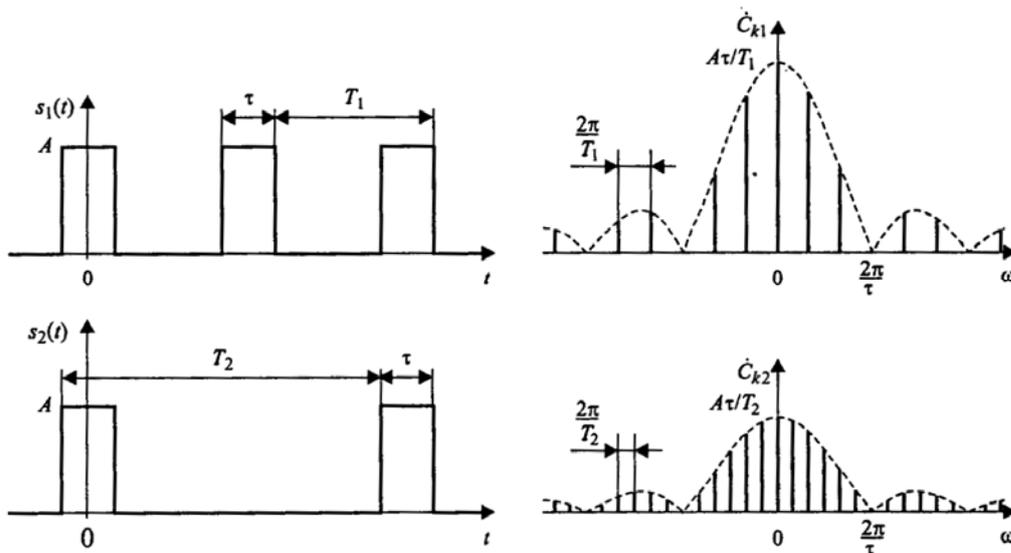


Рис.3. Особливості утворення спектрів імпульсних сигналів

В математиці відома функція яка отримала назву інтегрального синуса  $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$ .

Типові функції мають характерний вигляд (рис.4), і володіють специфічними спектральними характеристиками.

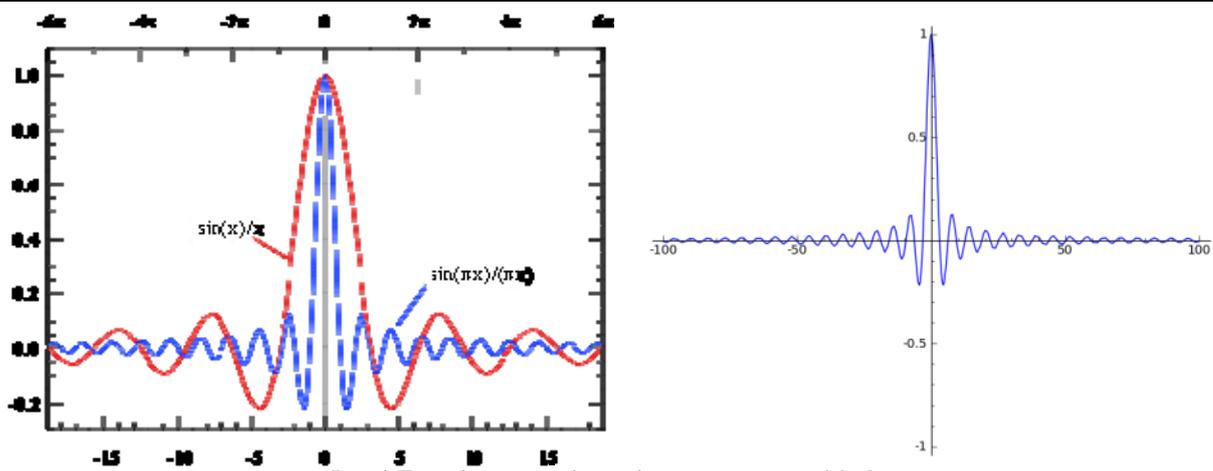


Рис. 4. Типові залежності при різних типах шкал вісі абсцис

Неважко помітити що із збільшення значень по вісі абсцис від 30 до 100 функція має згасаючий характер, (рис. 5).

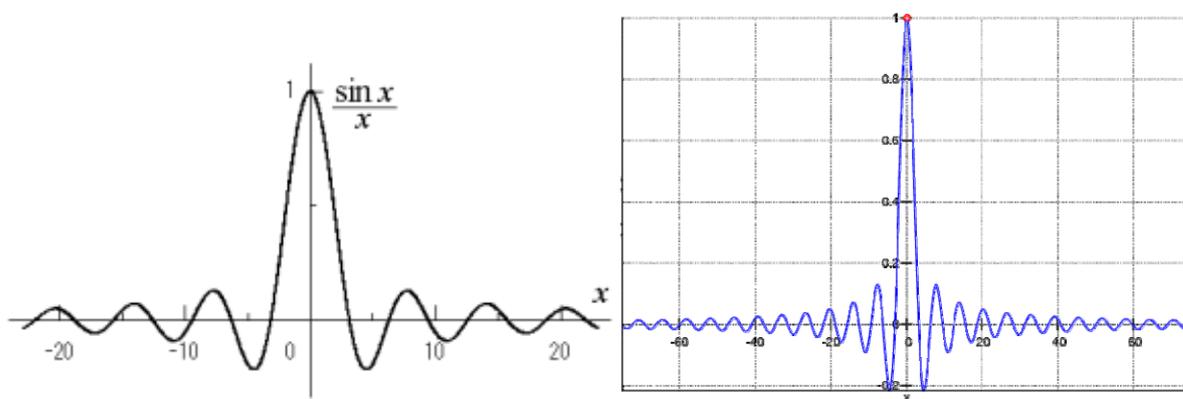


Рис. 5. Вигляд сигналу для значень від 20 до 60

Особливість функції є наявність постійної складової сигналу, що викликає певні проблеми під час його формування, тому інколи використовують тільки позитивні значення (рис.6.)

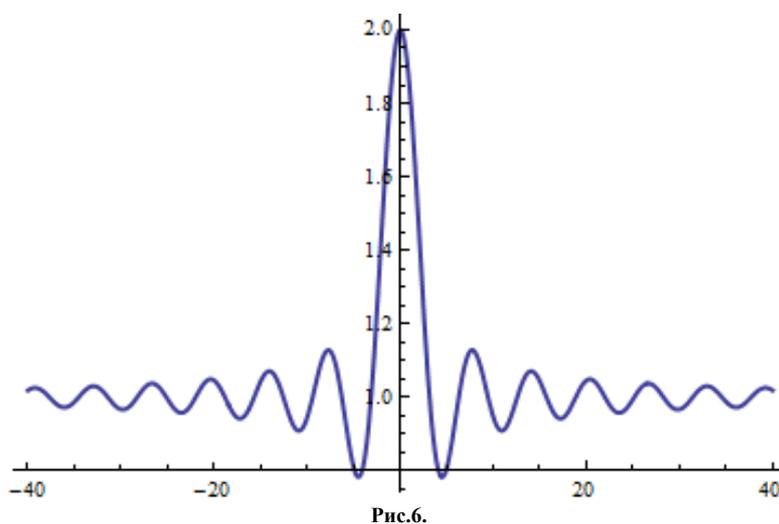


Рис.6.

Вигляд зміни спектру при зміні форми формуючої функцію у порівнянні, якісно має вигляд прямокутного частотного спектру, із співвідношеннями параметрів які обраховуються за наведеними вище визначеннями. (рис.7).

Виникає очевидне питання, практичної реалізації сигналів такої форми та оцінки форми спектральних складових. Нижче наведено [6-8] типові методи цифрового синтезу сигналів довільної форми, сучасними генераторами Tektronix, або Rohde & Schwarz. (рис.8).

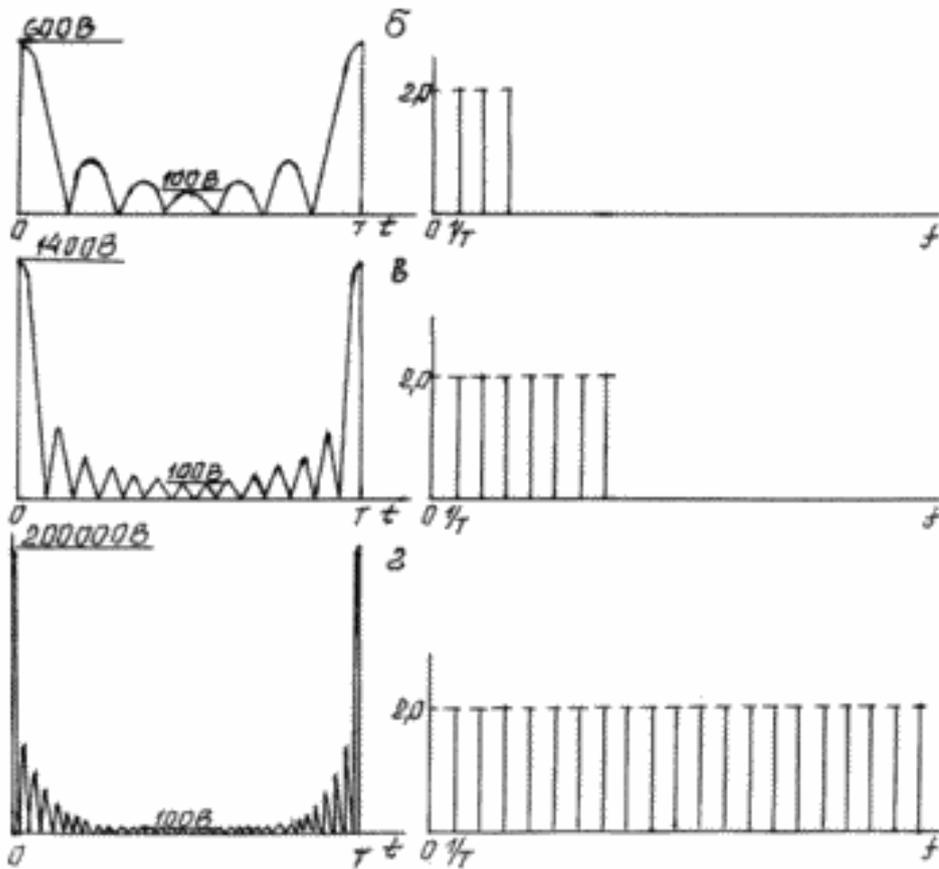


Рис. 7. Методологія утворення спектральних складових із «прямокутною обвідною»

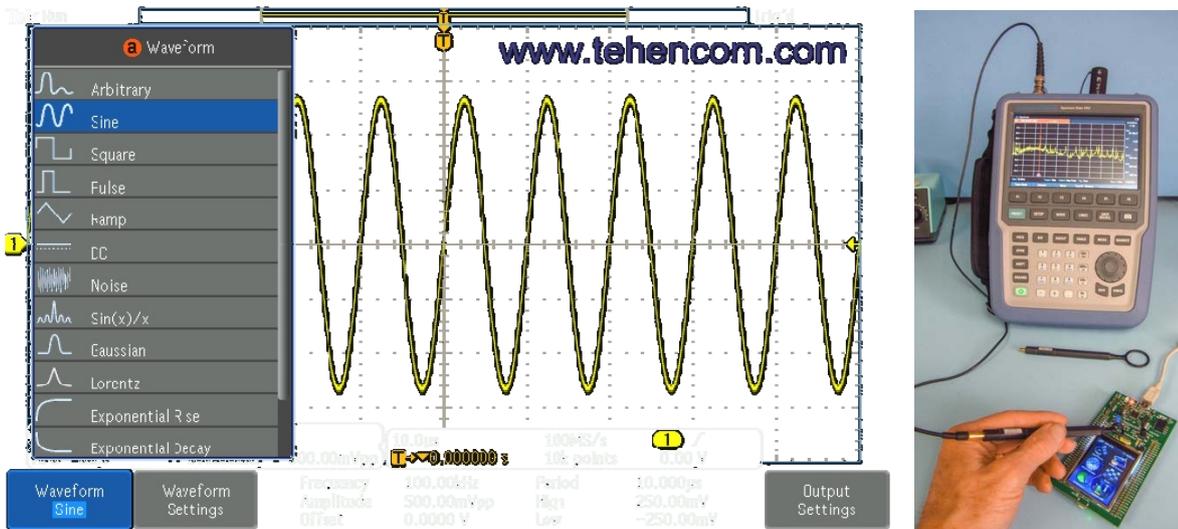


Рис.8. Формування сигналів та контроль генераторами Tektronix, або Rohde & Schwarz

Структурні схеми синтезаторів для формування сигналів довільної форми приведено на рис.9.

Генератор сигналів довільної форми і стандартних функцій (опція). Осцилограф серії MDO3000 містить опціональний вбудований генератор сигналів довільної форми і стандартних функцій (опція MDO3AFG), ідеальний для імітації сигналів датчика в процесі налагодження і для додавання шуму до корисних сигналів для моделювання несприятливих умов. Вбудований генератор сигналів довільної форми і стандартних функцій видає сигнали з частотою до 50 МГц, зокрема синусоїдальні, прямокутні, пилкоподібні і імпульсні сигнали, постійний струм, шум, **сигнали функцій кардинального синуса (Sinc)**, Гауса і Лоренца, експоненціального підйому і спаду, гаверсінуса і кардіосигнал.

Типовий вигляд реально сформованих сигналів (**Sinc**), управління «меандр» і спектральних складових «прямокутний лінійчатий», на екрані генератора сигналів довільної форми наведено на рис.10.

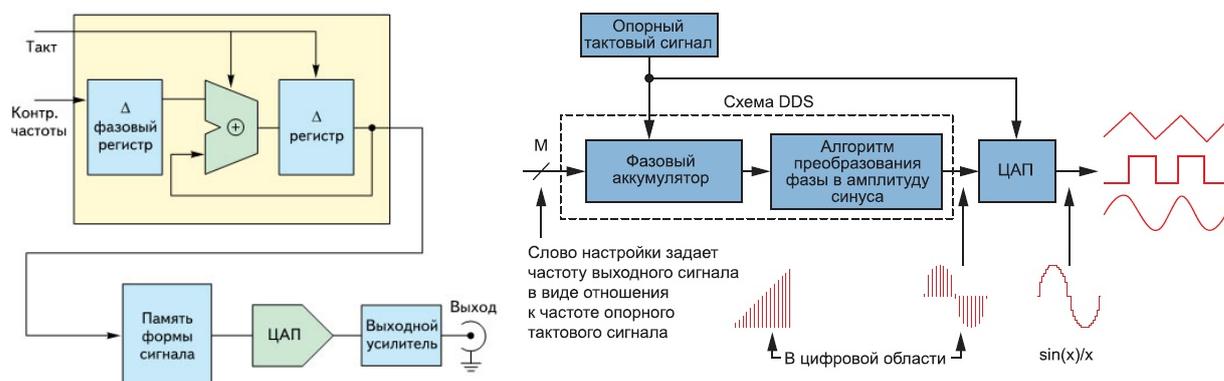


Рис.9 Структурні схеми синтезу сигналів

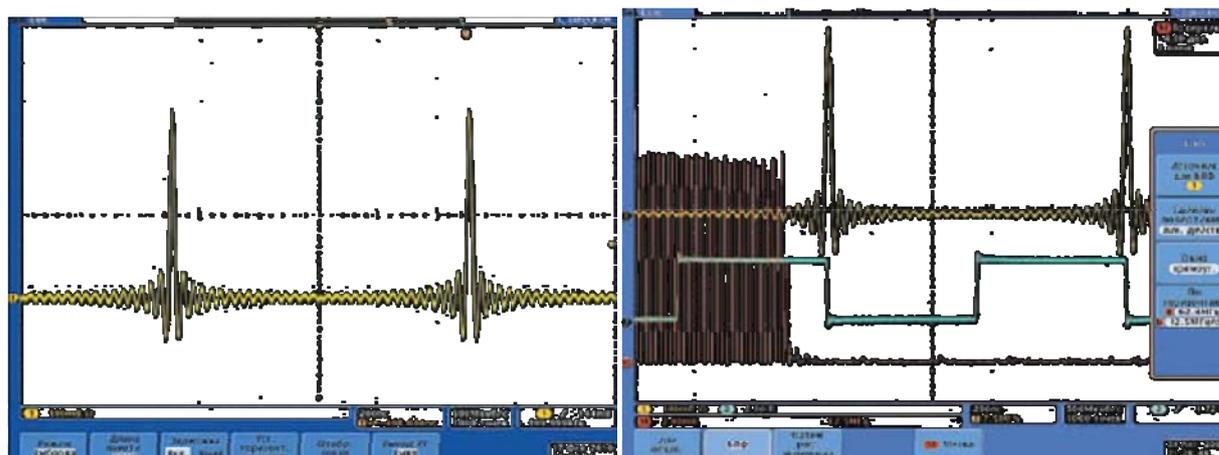


Рис.10. Формування сигналів Sinc та контроль генераторами Tektronix

Очевидним є факт що формування сигналів в межах частотного ресурсу БПЛА (табл1, табл.2) потребує високоточних ЦАП (12 і більше розрядів) з часом спрацювання менше 1нс, що не завжди можливе існуючим класичними ЦАП (подільник Кельвіна). Альтеративним варіантом виступають ЦАП нового покоління, які використовують Атенуатор-подільник Троцишина [5], особливо в режимі (дельта-сігма). [3,5].

Авторами проекту за останні 15 років розроблена Теорія ФЧВ і ПР, виготовлено та проведено випробування: частотоміра коінцидентії, вимірювального перетворююча частоти за методом коінцидентії, вимірювача девіації частоти, цифрових синтезаторів частоти (секвентності), формувачів функцій транс версії, напівсуматора секвентності, тощо які на практиці підтвердили основні положення теорії ФЧВ і ПР. Результати були використанні в ході виконання ряду держбюджетних тем (н/к Троцишин І.В.): 2Б-2005, 6Б-2007, 8Б-2009, (які успішно завершено та впроваджено), а також дослідження в частині ЦАП і АЦП нового покоління продовжуються в рамках 7Б-2013 (н/к Троцишин І.В.) (Хмельницький національний університет) [1-3,5]. В цьому науковому напрямку захищено 9 кандидатських і докторська дисертації.

Тому питання полягає в адаптації отриманих нових результатів із унікальними можливостями застосувати для такої важливої задачі РЕБ, які в мирний час навіть не передбачались!!

В основу покладено **методи** Теорії ФЧВ і ПР, сутність підходів яких є вищим рівнем ієрархії методів та засобів вимірювання та формування фазочастотних і амплітудних параметрів радіосигналів, які дозволили покращити в 10-100 разів (принципово незмінний у «класичних підходах» параметр) точність  $x$  швидкодія. Фазочастотний підхід вказує, що частоти, у класичному розумінні як величини оберненої до періоду не має і бути не може, а є лише похідно від повної фази. В області цифрового синтезу формується секвентність а не частота, що відкриває нові можливості синтезу навіть за межею Найквіста, тощо. Появились можливість здійснення Зовнішньої частотної модуляції, компенсації (або створення штучно) частоти Допплера, тощо.

Тому саме **Підходи** із позицій теорії ФЧВ і ПР відкривають нові можливості для оброблення радіосигналів, які принципово неможливо з «класичних позицій» [1-3,5].

#### Об'єкти БПЛА які типовими для РЕБ [6]

Найбільш широко для проведення авіарозвідки в реальному режимі часу використовуються квадрокоптери (рис.11) і цифровою камерою високого роздільності, стосовно яких дієвим можуть бути системи подавлення а також системи ліквідації, які використовують радіопеленгатор на базі **Sinc**.



Рис. 11. Квадрокоптер

В той же час існує клас Ударний БПЛА Supervisor SM 2B (рис.12), стосовно яких ефективним, а більшості випадків безальтернативним є системи ліквідації, «дронами комікадзо».



Рис.12. Ударний БПЛА Supervisor SM 2B

БПЛА Supervisor SM 2B є автоматизованим ударним комплексом. Комплекс оснащений можливістю визначення координат цілі і завантаження даних в ракету перед стартом. Простота підготовки до запуску, управління, короткий час приведення в робочий стан, великий діапазон робочих умов, малорозмірних, високоточна бойове навантаження характеризують комплекс як найбільш боєздатним серед ударних БПЛА і не має аналогів у світі. Тепловізійний сенсор дозволяє використовувати комплекс в нічний час.

Склад комплексу:

Наземна станція управління: захисний транспортний контейнер, ударостійкий ноутбук із спеціальним ПО, портативний антенний комплекс, автоматичний зарядний пристрій, запасна бортова АКБ, складальний інструмент, ЗП. БПЛА: для збільшення маси і габаритів корисного навантаження, тривалості польоту, зручності трансформації в транспортний стан, застосована схема «літаюче крило» з штовхає двигуном і автоматичним складним гвинтом. Корпус виготовлений з композитних матеріалів з широким застосуванням вуглеволокна. Відеосистема з ІЧ-сенсором дозволяють в онлайн-режимі передавати якісне відео, а також сигнал в ІК діапазоні на екран ноутбука.

Система управління напівавтоматична, з онлайн-телеметрією, прив'язкою до електронних карт, аварійним режимом повернення в точку старту, аварійної активацією посадкової парашутної системи, внесенням коректив у маршрут під час польоту [6].

Основною ідеєю роботи є вирішення двох принципових питань комплексу захисту території від зняття інформації, перше це виведення керування (примітивний апарат впаде на землю, більш програмовані, повернуться у вихідну точку, що забезпечить певний захист).

У випадку застосування автоматичних трас важливим є блокування передачі відеоінформації, тому система РЕБ повинна подавляти всі канали сучасних систем передачі завадостійких (FFSS, ADT, GSM, CDMA,) тощо.

Використання методів КТВП дозволяє формувати сигнали із потрібними характеристиками невідомими раніше методами, наприклад використовуючи програмування характеристик ЦАП-АЦП (АПТ Троцишина), або вимірювання та формування частоти сигналу за методом коінцидентії, або ж зовнішньої частотної модуляції, чи навіть адаптивного формування «прямокутного спектру» (рис.13).

**Гіпотеза** яка є цільовою для проекту, це **унеможливлення саме оперативного зняття розвідувальної інформації** безпілотними засобами в умовах динаміки бойових дій, коли від ефективності РЕБ залежить захист військ від вогневого враження. В цілому розробка знайде широке застосування у забезпеченні військових Міністерства оборони, а також Прикордонної служби України, в системах

моніторингу МНС Україна, на об'єктах з підвищеним рівнем екологічної небезпеки (атомні станції, хімічні підприємства, тощо).

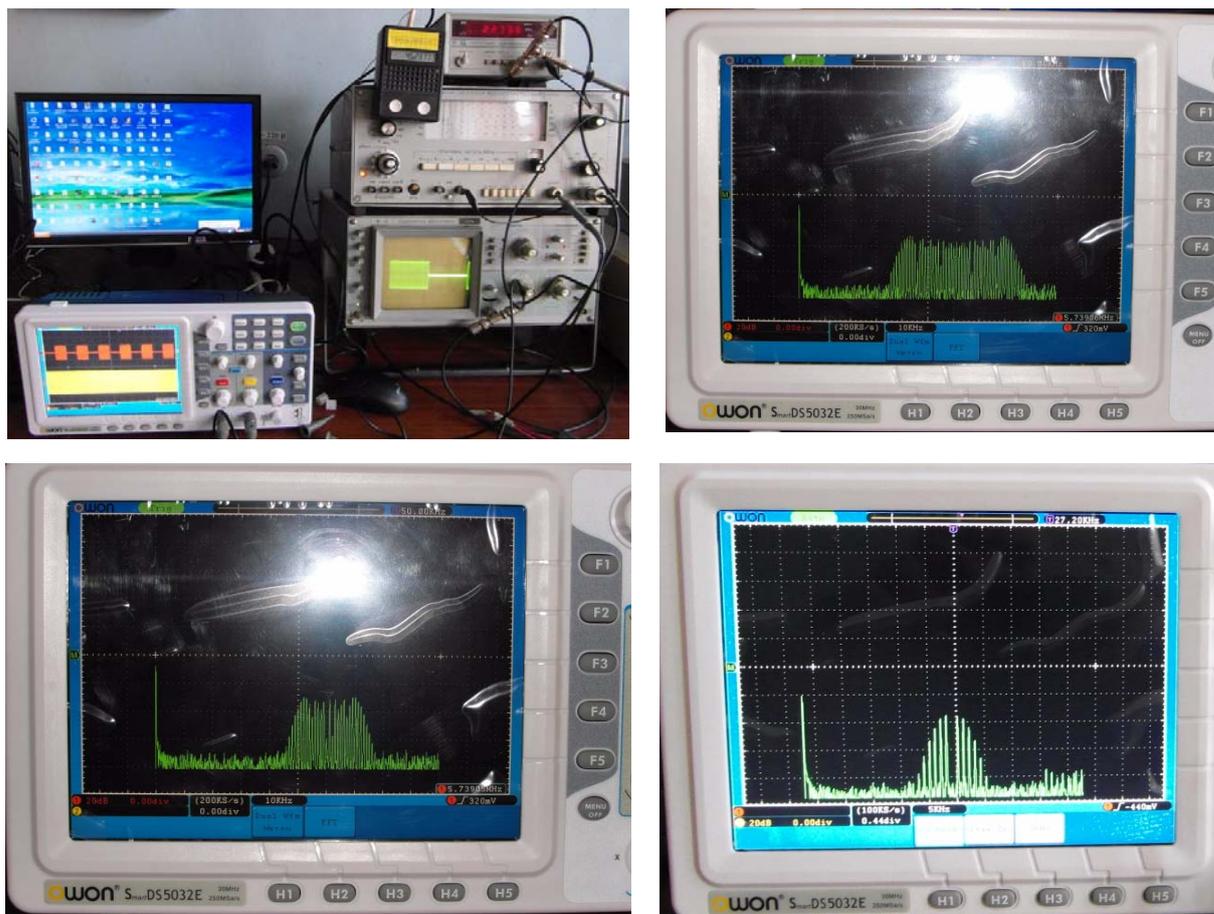


Рис. 13. Формування сигналів для подавлювачів в рамках КТВП і фазочастотного підходу

### Висновки

**Очікувані наукові та науково-технічні результати та їх переваги над аналогами.** Будуть використані принципово нові технології Теорії ФЧВ і ПР, які мають суттєві переваги над існуючими і дозволяють створювати засоби із новим властивостями. Будуть розроблені макетні та експериментальні зразки для систем РЕБ в МГц і ГГц діапазонах для типових модулів радіоканалів із заводських (FFSS, ADT, GSM, CDMA,) тощо. Буде розроблене необхідне програмне забезпечення для автоматичного виявлення та блокування безпілотних засобів. Будуть розроблені методики комплексу заходів по розгортанню РЕБ та методичні рекомендації для користувачів (бійців АТО). Буде розроблена ескізна документація для виготовлення макетних та експериментальних зразків. Перспективи подальшого розвитку отриманих результатів дослідження. Перспективним є створення нових систем радіозв'язку на засадах принципів теорії ФЧВ і ПР, які стійкі до РЕБ нового покоління (детальна інформація є конфіденційною).

### Література

1. Троцишин. І. В. Квантова теорія вимірювального перетворення: принципи та методологія, на шляху від частотоміра коінциденції до атенюатора-подільника Троцишина / І.В. Троцишин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – №1. – С. 27-37. [http://elibrary.ru/cit\\_title\\_items.asp?id=38428](http://elibrary.ru/cit_title_items.asp?id=38428)
2. Троцишина Н.І. Атенюатор-подільник Троцишина як базовий функціональний елемент нових принципів вимірювального перетворення ЦАП-АЦП / Н.І. Троцишина, І.В. Троцишин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – №1. – С.118-120. <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1260975>
3. Троцишин І.В. Методологія побудови ЦАП-АЦП с програмуємими параметрами характеристики преобразования на основе атенюатора-делителя Троцишина и их исследование / И.В. Троцишин. Н.И. Троцишин, М.И. Троцишин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – №2. – С. 50-56. <http://elibrary.ru/item.asp?id=21167140>.
4. <http://glushi.com.ua>
5. Патент України 100581. Спосіб побудови атенюатора-подільника Троцишина./ Троцишин І.В.// МПК (2013.01) G01R 15/00 G06G 7/16 (2006.01) G11C 8/00 H02M 3/06 (200), Опубліковано 10.01.2013, Бюл. № 1.

6. <http://www.tehencom.com/Info/Contacts/Contacts.htm>
7. [www.tehencom.com](http://www.tehencom.com)
8. <http://www.tehencom.com/Companies/Tektronix/Tektronix>.
9. Горященко К.Л. Визначення спектральних складових сигналу з нецілими періодами складових / К.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – №1. – С. 195-198

**References**

1. I. V. Trotsishin. Quantova teoriya vimiryuvalnogo peretvorenniya: principy ta metodologiya na shlahu vid chastotomira kointsidentsii do attenuatora-podilnika Trotsishina / I.V. Trotsishin // Vimiryuvalna that obchislyuvalna tehnika in tehnologichnih processes. - 2013. - №1. - С.27-37. [http://elibrary.ru/cit\\_title\\_items.asp?id=38428](http://elibrary.ru/cit_title_items.asp?id=38428)
2. N.I. Trotsishina. Attenuator-podilnik Trotsishina yak Basovyy funktsionalnyy element novih printsipiv vimiryuvalnogo peretvorenniya DAC-ADC / N.I. Trotsishina, I.V. Trotsishin // Vimiryuvalna that obchislyuvalna tehnika in tehnologichnih protsesah. - 2013. - №1. - С.118-120. <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1260975>
3. I.V. Trotsishin. Methodology postroeniaCAP-ACP z programiruemymi characteristicami preobrazovania na osnove attenuatora-dlelatelya Trotsishina I ih issledovanie / IV Trotsishin. NI Trotsishin, MI Trotsishin // Vimiryuvalna that obchislyuvalna tehnika in tehnologichnih processes. - 2013. - №2. - С. 50-56. <http://elibrary.ru/item.asp?id=21167140>.
4. <http://glushi.com.ua>
5. Patent Ukraine 100581. Sposib pobudovi attenuatora-podilnika Trotsishina. / Trotsishin I.V. // IPC (2013.01) G01R 15/00 G06G 7/16 (2006.01) G11C 8/00 H02M 3/06 (200) Published 01.10.2013, Bull. Nomer 1.
6. <http://www.tehencom.com/Info/Contacts/Contacts.htm>
7. [www.tehencom.com](http://www.tehencom.com)
8. <http://www.tehencom.com/Companies/Tektronix/Tektronix>.
9. Horiashchenko Kostyantyn. Spectral components definition of the signal with harmonic signal noninteger period components. Khmelnytsky National University, Khmelnytsky, Ukraine. 2014. Issue 1. P. 195-198

Рецензія/Peer review : 13.9.2015 р.

Надрукована/Printed :24.12.2015 р.

---

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради  
Хмельницького національного університету,  
протокол № 4 від 26.11.2015 р.**

Підп. до друку 15.12.2015 р. Ум.друк.арк. 25,1 Обл.-вид.арк. 23,88  
Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.  
Наклад 100, зам. № 104/01

Тиражування здійснено редакційно-видавничим центром  
Хмельницького національного університету  
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-633