МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# ИЗВЕСТИЯ ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

# Серия ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Выпуск 9

№ 10(137) <sup>Межвузовский сборник научных статей</sup> 2014



# УДК 519.284+541.183+621.3+539.2

Учредитель: ГОУ высшего профессионального образования «Волгоградский государственный технический университет»

Сборник зарегистрирован в Управлении регистрации и лицензионной работы в сфере массовых коммуникаций федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия ПИ № ФС77–25660 от 13 сентября 2006 г.

# Главный редактор сборника «Известия ВолгГТУ»

академик РАН И. А. Новаков

Редакционная коллегия серии:	д-р физмат. наук, проф., акад. МАР А. Г. Шеин (научный редактор) д-р техн. наук, проф., акад. МАР Ю. П. Муха (зам. научного редактора)
	д-р физмат. наук, проф., акад. РАЕН В. Б. Байбурин д-р физмат. наук, проф., акад. РАЕН О. В. Бецкий д-р физмат. наук, проф. акад. МАР В. А. Смоляр д-р техн. наук, проф. акад. МАР В. А. Смоляр д-р техн. наук, проф., акад. МАР А. Н. Шилин д-р техн. наук, проф. А. С. Гольцов д-р физмат. наук, проф. Л. В. Жога д-р физмат. наук, проф. В. П. Заярный д-р физмат. наук, проф. С. В. Крючков д-р техн. наук, проф. В. Д. Захарченко д-р техн. наук, проф. В. В. Яцышен канд. физмат. наук, доц. С. С. Жуков

Т. В. Авчарова (секретарь редколлегии)

Печатается по решению редакционно-издательского совета Волгоградского государственного технического университета

Известия Волгоградского государственного технического университета : межвуз. сб. науч. ст. № 10(137) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – 112 с. (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь»; вып. 9). ISBN 978–5–9948–1530–4

Представлены работы: по общим вопросам электроники; полупроводниковой, вакуумной и молекулярной электронике; информационно-измерительным системам в промышленности и медицине; теории измерений; радиотехнике.

Ил. 79. Табл. 7. Библиогр.: 160 назв.

ISBN 978-5-9948-1530-4

© Волгоградский государственный технический университет, 2014

# СОДЕРЖАНИЕ \_\_\_\_\_

# Часть 1. ЭЛЕКТРОНИКА

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОНИКИ ——	
Скворцов М. Г.	
Нейросетевая диагностика состояния плазмы	7
Воронин П. В.	
Критерий устойчивости ортопланарных тригональных точек либрации в пространстве бинарной системы, стабилизированной во внешнем ортогональном магнитном поле	11
——— ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА ———	
Литинский А. О., Нгуен Тхи Ша	
Энергетический спектр электронов и особенности оптического	
поглощения однослойных гидроксисилоксановых структур	
с дефектами замещения силанольных групп электронодонорными атомами	16
Бакулин П. А., Жога Л. В., Коренева В. В., Нестеров В. Н.	
Ток утечки в сегнетокерамической пластине	
при постоянной напряженности электрического поля	22
Литинский А. О., Жуков С. С., Михайленко Е. К.	
Электронно-энергетические и магнитные характеристики $SnO_2$	26
с дефектами замещения атомов олова атомами индия	20
Медников С. В., Подопригора А. Г., Харахордин А. В.	
с фотоактири им примесями	32
е фотоактивными примесями	52
Ермолаев А. В., Ермолаева А. А., Поляков И. В.	
при молуляции высоконастотного сигнала	
переменным анолным напряжением	36
Геркин Л. Л.	
Полавление комбинационных составляющих при усилении	
полигармонического сигнала в ЛБВ М-типа	41
ВОПРОСЫ БИОМЕЛИЦИНСКОЙ РАЛИОЭЛЕКТРОНИКИ	
Никитин А. А., Грецова Н. В.	16
Модель ионного транспорта в ячейке из двух мембран	40
Часть 2.ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА	
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ	
Рзиева М. Т.	
Анализ распределений вероятности случайных последовательностей с требуемыми корреляционными связями при имитационном моделировании	50
Мелентьев В. С., Иванов Ю. М., Муратова В. В.	
Исследование метода измерения интегральных характеристик	
по мгновенным значениям сигналов, разделенным в пространстве	52

Романенко Р. П.	
Математическое моделирование определения ускорения	
подвижного объекта	56
Ватутин Э. И., Дремов Е. Н., Мартынов И. А., Титов В. С.	
Метод взвешенного случайного перебора для решения задач	
дискретной комбинаторной оптимизации	59
——— ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЙ ———	
Нестеров В. Н., Ли А. Р.	
Анализ условий инвариантности шестиплечего измерительного моста	64
Скворцов М. Г.	
Диагностика состояния автономного робота в реальном масштабе времени	68
Лукьянчиков Е. В., Полунин А. В., Болецкий Е. Б.	
Способ увеличения разрешения единичного изображения	72
Сизов А. С., Цепов А. Ю.	
Программная реализация системы оценки инвестиционной	
привлекательности малого инновационного предприятия	75
ПРОМЫШЛЕННОСТИ МЕЛИЦИНЕ	
Нестеров В. Н., Нестеров Д. В.	
Основы оптических измерении информативных компонентов	78
$\Pi_{O}$	70
Полунин А. Б., Груфинов М. И., Гитов Б. С. Бинокулярная система технического зрения с видеолятчиком	
с изменяемым фокусным расстоянием для мобильного робота	83
Муха Ю П Секацёв В 4	02
Алгоритм лля определения возможности наложения направленных графов	87
	• ·
Часть З.РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ	
Заярный В. П. Парпула С. А., Гирич В. С.	
Дисковая антенна кругового обзора на основе линейно расширяющихся	
целевых линий	98
Захарченко В. Д., Верстаков Е. В., Толика О. М.	
Радиолокационное наблюдение за протяженными объектами	
с использованием стробоскопической РЛС	102
Карпухин А. В.	
Методика проектирования компьютерных сетей	
с учетом особенностей протокола ТСР	106

# CONTENS

# Part 1. ELECTRONICS

THE GENERAL QUESTIONS OF ELECTRONICS	
Skvortsov M. G. Neural network diagnostics of the state of plasma	7
Criterion of stability of ortoplanary triangular equilibrium points in space of binary system, stabilized in an external orthogonal magnetic field	11
SEMICONDACTOR ELECTRONICS AND NANOELECTRONICS	
Litinski A. O., Nguyen Thi Sa Electron energy spectrum and peculiarities of optical absorption of single-layer hydroxysiloxane structures with substitution defects of silanol groups by electron-donor atoms	16
Bakulin P. A., Joga L. V., Koreneva V. V., Nesterov V. N.	
Leakage current in ferroelectric plates at constant voltage electric field	22
Electronic energy and magnetic characteristics of tin dioxide with Sn-by-In substitution defects	26
Mednikov S. V., Podoprigora A. G., Kharakhordin A. V. Kinetics of phosphorescence triglycine sulphate crystals with photoactive dopants	32
VACUUM ELECTRONICS	
<i>Ermolaev A. V., Ermolaeva A. A., Polyakov I. V.</i> Combinational components in the generation spectrum magnetron modulation of high anode alternating anode voltage	36
Yeskin D. L. The combinational frequencies suppression by the multigarmonic signal amplification in a TWT M-type	41
BIOMEDICAL ELECTRONICS	
<i>Nikitin A. A., Gretsova N. V.</i> The model of ionic transport in a cell with two membranes	46
Part 2. MEASURING TECHNICS	
———— THEORY OF MEASURING	
<ul> <li>Rzieva M. T. Analysis of the probability of the distributions of random sequences in accordance with the required correlation relationships in simulation modeling</li> <li>Melentiev V. S., Ivanov Y. M., Muratova V. V.</li> </ul>	50
Method of measurement of integrated characteristics on instant values of signals, separated in space	52

Romanenko R. P.	57
Mathematical modeling determine the acceleration of a moving object	56
Method of weighted random search for solving discrete combinatorial optimization problems	59
THE GENERAL QUESTIONS OF MEASURING	
Nesterov V. N., Li A. R.	
Analysis of invariance conditions of six shoulder measuring bridge	64
Skvortsov M. G.	
Diagnostics of the state of an autonomous robot in real time	68
Lukianchikov E. V., Polunin A. M., Boletskiy E. B.	
A method of a single image resolution enhancement	72
Sizov A. S., Tsepov A. J.	
Software implementation of the investment attractiveness	
of small innovative company	75
MEASURING DEVICES IN THE SCIENCE, THE INDUSTRIES, IN MEDICINE	
Nesterov V. N., Nesterov D. V.	
Fundamentals of optical measurements of informative components of complex movements	78
Polunin A. V., Truphanov M. I., Titov V. S.	
Stereo vision system with zoom lens for mobile robot	83
Mucha Y. P., Sekashev V. A.	
Algorithm for definition of possibility of imposing of the directed counts	87
Part 3. RADIOTECHNICS AND TELECOMMUNICATION	
Zayarniy V. P., Parpula S. A., Girich V. S.	
Disk all-round looking antenna based on linear expanding slot lines	98
Zakharchenko V. D., Verstakov E. V., Tolika O. M.	
Extensional objects observation with use of stroboscopic radar	102

	Extensional	objects o	USCI vation	with use	or shouse of	JIC .
Karpuki	hin A. V.					

Computer network design methods taking into account features of TCP protocol...... 106

# Часть 1 📃

# ЭЛЕКТРОНИКА

# ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОНИКИ —

УДК 621.3

М. Г. Скворцов М. G. Skvortsov

# НЕЙРОСЕТЕВАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ПЛАЗМЫ NEURAL NETWORK DIAGNOSTICS OF THE STATE OF PLASMA

# Волгоградский государственный технический университет Volgograd State Technical University

E-mail: neurnet@mail.ru

Представлены описания структурной схемы нейросетевой диагностики состояния плазмы, иерархической структуры физического объекта для построения интегрального параметра. Нейросетевая измерительная система оценки состояния объекта по интегральному параметру позволяет сократить количество дорогостоящих экспериментов (из-за ограниченного количества данных для нейросетевой аппроксимации зависимости параметров плазмы от измеряемых величин) и ускорить получение результатов за счет параллельной обработки данных.

*Ключевые слова*: состояние плазмы, нейросетевая диагностика состояния по интегральному параметру, иерархическая структура физического объекта, нейросетевая измерительная система.

Are descriptions of the structural scheme of the neural network diagnostics of the plasma, the hierarchical structure of the physical object to build an integral parameter. Neural network measuring system of an estimation of a condition of object by the integral parameter allows to reduce the number of expensive experiments (due to the limited amount of data for the neural network approximation of the dependence of the parameters of plasma from the measured values) and accelerate results due to parallel processing.

*Keywords*: the plasma state, neural network diagnostics of a condition on an integral parameter, the hierarchical structure of the physical object, neural network measurement system.

Плазма, рассматриваемая как объект диагностики, является сложной эволюционирующей системой, состоящей из большого количества разнородных компонентов (электронов, ионов и нейтралов). Целью диагностики плазмы является выявление основных характеристик процессов в исследуемой плазме и нахождение способов управления состоянием плазмы (значениями ее параметров: температурой, концентрацией, интенсивностью излучения в определенных спектральных диапазонах, временем жизни и структурой плазменного образования).

Особенностью задачи оценки состояния плазменных объектов является большой объем косвенных результатов измерений, поступающих в режиме реального времени и требующих предварительной обработки [1, 2]. Существующие трудности реализации многих методов диагностики возникают из-за сложной связи косвенных измеряемых величин с параметрами плазмы. К регистрируемым параметрам плазмы относятся: вольтамперные характеристики разряда; пространственно-разрешенный спектр излучения в различные фиксированные моменты времени; излучение разряда в различных спектральных диапазонах; форма и скорости движения плазменных образований; среднее давление в плазме и окружающих областях. Вычисляемыми параметрами состояния плазмы являются: энергия и мощность, вкладываемые в разряд; пространственно-временное распределение массового состава плазмы (концентрация электронов, нейтралов, ионов); параметры ударных волн (УВ); яркостная температура; характерные пространственные, временные масштабы и скорости движения плазменного образования. Из сопоставления регистрируемых и вычисляемых параметров следует необходимость широкого применения информационных технологий в обработке, анализе и моделировании результатов плазменного эксперимента.

Актуальной задачей является внедрение в диагностике состояния сложных физических объектов нейросетевых измерительных систем (ИС/НС) [3, 4, 5] для экспресс-обработки в режиме реального времени измеренных косвенных сигналов, вторичной обработки для получения параметров плазмы и последующего анализа экспериментальных данных. Концепция предложенного класса измерительных систем ИС/НС отличается от известных нейросетевой средой реализации; рассмотрением нейронной сети как супермногоканальной измерительной системы; подходом к диагностике состояния сложных объектов как системным измерениям интегрального параметра (с формированием иерархической структуры физического объекта, построением интегральных параметров каждого уровня иерархии, совместной регистрацией и анализом изменения диагностических параметров на всех уровнях иерархии). Проектирование ИС/НС включает построение системных функциональных преобразователей для построения интегрального параметра; формирование принятого эталона состояния плазмы [6]. Количественная оценка общего состояния физического объекта (интегральный параметр) определяется по степени отклонения совокупности показателей компонентов и подсистем плазмы от заданных эталонных значений.

При этом используются такие преимущест-

ва нейросетевых технологий, как возможность аппроксимации зависимости параметров плазмы от измеряемых величин по ограниченному набору данных; работа с зашумленными данными; естественное распараллеливание при обработке результатов, обеспечивающее работу в режиме реального времени.

Причиной построения интегрального параметра (ИП) состояния физического объекта является необходимость разрешения противоречия между сложностью задачи диагностики плазмы в современной постановке и ограничениями системы восприятия экспериментатора, принимающего решения (о достижимости плазмой заданного состояния, требуемого для соответствующих областей применения: накачки лазеров, применения в обрабатывающей промышленности) по результатам многочисленных физических измерений.

Иерархическая модель плазмы (рис. 1) представлена уровнем первичных измерений (скоростным фоторегистратором – СФР; лазерным рассеянием; регистрацией излучения в различных спектральных диапазонах – ФЭУ; пьезодатчиками и т. д.), компонентным уровнем (электронами, ионами и нейтралами), уровнем информационно-энергетических подсистем (структурой плазменного образования, излучением в различных диапазонах, УВ, электромагнитными полями) и уровнем системы (плазмой в целом).



Рис. 1. Иерархическая модель физического объекта

Оценка состояния физического объекта на разных уровнях иерархии проводится по результатам текущих измерений.

Контроль состояния на компонентном уровне (электроны, ионы, нейтралы) осуществляется по результатам оценки температуры и концентрации соответствующих компонент. На информационно-энергетическом уровне контроль плазменного образования представлен следующими вариантами: оценкой скорости УВ, яркостной температуры, размеров и времени жизни плазменного образования.

На системном уровне (плазма в целом) состояние объекта оценивается в зависимости от прикладной задачи (создание плазмы заданных оптических свойств для накачки лазеров; создание мощных УВ для воздействия на объекты; создание плазмы заданной температуры, времени жизни и конфигурации для применения в обрабатывающей промышленности, а также для моделирования сложных излучающих объектов).

Для моделирования состояния компонентов плазмы соответствующего уровня применяется нейросетевой системный функциональный преобразователь [7]. Иерархия системных функциональных преобразований (СФП), отображающих иерархическую модель плазмы, представлена на рис. 2.



Рис. 2. Иерархия системных функциональных преобразований

На нижнем уровне иерархии системный функциональный преобразователь СФПЗ отображает формирование результатов соответствующих измерений (ФЭУ, пьезодатчиков) с образованием на выходе интегральных параметров ИПЗ. На уровне компонентов СФП2 отображает формирование состояния соответствующего компонента плазмы (по входным сигналам, поступающим с нижних уровней иерархии) с образованием на выходе интегральных параметров ИП2. На уровне информационноэнергетических систем их состояние моделируется в СФП1 с образованием на выходе интегральных параметров ИП1. На уровне плазмы в целом СФПО моделирует формирование состояния плазмы по входным сигналам от всех информационно-энергетических подсистем с образованием на выходе интегрального параметра плазмы ИПО.

Плазменный эксперимент (рис. 3) проводится по следующей методике [1, 2, 3]: на основании априорных данных устанавливаются модель плазмы, интервалы значений регистрируемых сигналов, параметров и принятого эталона состояния плазмы; в рамках принятой модели выбираются допустимые методы диагностики параметров; по сформированным обучающим выборкам строятся и тестируются HC модели (СФП), калибруются HC измерительные каналы; создается плазма и проводятся измерения с регистрацией требуемых сигналов; формируется ИП; анализируются и интерпретируются полученные результаты.

Первичная обработка измеряемых сигналов проводится в нейросетевых измерительных каналах. Каждый измерительный канал состоит из фильтра (Ф), нормализатора (Н), аналогоцифрового преобразователя (АЦП) и масштабирующего устройства (МУ). Вторичная обработка данных (определение параметров состояния, построение интегрального параметра плазмы) происходит в НС моделях с помощью системных функциональных преобразователей (СФП). Нейросетевые модели формируются в процессе параметрического синтеза (обучения) [6, 7] на обучающей выборке, учитывающей как эталонное состояние параметров всех компонентов и подсистем, так и наиболее существенные варианты возникновения отклонений параметров плазмы. Режим реального времени обеспечивается программно-аппаратной реализацией нейросетевых измерительных систем на нейроускорителе МС4.31 с нейрочипом NM6403 [6].



Рис. 3. Структурная схема нейросетевой диагностики состояния плазмы

Интегральный параметр (количественная оценка состояния, построенная по иерархической структуре объекта) формируется по степени достижения плазмой совокупности требуемых показателей состояния (излучение разряда в различных спектральных диапазонах; время жизни, температура, размеры области свечения), соответствующих конкретным областям применения плазменного объекта (накачка лазера, обрабатывающая промышленность).

Системная экспресс-диагностика состояния плазмы по интегральному параметру позволяет сократить количество дорогостоящих экспериментов (из-за ограниченного количества данных для нейросетевой аппроксимации зависимости параметров плазмы от измеряемых величин) и ускорить получение результатов за счет параллельной обработки данных.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование состава плотной плазмы в атмосфере / А. Ф. Александров [и др.] // Теплофизика высоких температур, 1985, вып. 6. – С. 1219–1221.

2. Получение и исследование тороидальных плазменных структур в воздухе / А. Ф. Александров [и др.] // Журнал технической физики, 1986, т. 56, вып. 12. – С. 2392–2396.

3. *Муха, Ю. П.* Нейросетевые измерительные системы. Диагностика состояния сложных объектов. Кн. 24 : монография / Ю. П. Муха, М. Г. Скворцов. – М.: Радиотехника, 2007. – 336 с.

4. Скворцов, М. Г. Адаптивное управление и метрология измерений в диагностической системе на базе нейронных сетей / М. Г. Скворцов, Д. Г. Дружинин, Д. В. Жмурин // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2004. – № 4. – С. 57–62.

5. Скворцов, М. Г. Применение измерительных систем с элементами нейронных сетей для выявления пограничных состояний сердечно-сосудистой системы / М. Г. Скворцов, Д. Г. Дружинин // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2002. – № 8. – С. 56–58.

6. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Российская Федерация. Проектирование нейросетевых измерительных систем для оценки состояния сложных объектов / Ю. П. Муха, М. Г. Скворцов, Д. П. Мамонтов, Е. М. Гребешкова ; правообладатель ВолгГТУ ; № 2010616868 ; заявл. 20.08.2010 ; зарегистрировано 14.10.2010.

7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Российская Федерация. Моделирование нейросетевых измерительных систем / Ю. П. Муха, М. Г. Скворцов, Е. М. Гребешкова ; правообладатель ВолгГТУ, № 2010616963 ; заявл. 24.08.2010 ; зарегистрировано 18.10.2010. УДК 530 + 531

# П. В. Воронин P. V. Voronin

# КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОРТОПЛАНАРНЫХ ТРИГОНАЛЬНЫХ ТОЧЕК ЛИБРАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ БИНАРНОЙ СИСТЕМЫ, СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ВО ВНЕШНЕМ ОРТОГОНАЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

# CRITERION OF STABILITY OF ORTOPLANARY TRIANGULAR EQUILIBRIUM POINTS IN SPACE OF BINARY SYSTEM, STABILIZED IN AN EXTERNAL ORTHOGONAL MAGNETIC FIELD

# Волгоградский государственный технический университет Volgograd State Technical University

E-mail: voronin.petva2015@yandex.ru

В работе рассматриваются точки либрации малой частицы, располагающиеся в плоскости, перпендикулярной плоскости орбит частиц, образующих бинарную систему, стабилизированную во внешнем ортогональном магнитном поле, и проходящей через центры масс этих частиц - ортопланарные тригональные точки либрации (ОТТЛ). Устанавливается критерий устойчивости ОТТЛ.

Ключевые слова: магнитное поле, бинарная система, точки либрации.

In work the equilibrium points of a small particle, which is settling down in a plane, perpendicular plane of orbits of particles, forming binary system, stabilized in an external orthogonal magnetic field, and taking place through the centres of weights of these particles - ortoplanary triangular equilibrium points (OTEP), are considered. The criterion of stability OTEP is established.

Keywords: magnetic field, binary system, equilibrium points.

#### Введение

Рассмотрим малую частицу массы М с зарядом Q, находящуюся в пространстве бинарной системы, стабилизированной во внешнем ортогональном магнитном поле [1]. Свяжем с бинарной системой синодическую [1] систему координат, в которой вектор магнитной индукции внешнего магнитного поля может быть представлен в виде  $\mathbf{B} = \{0, 0, B_z\}$ . Будем считать, что бинарная система образована частицей массы  $M_1$  с зарядом  $Q_1$  и частицей, масса и заряд которой равны соответственно  $M_2$ и  $Q_2$ . Для определенности положим  $M_2 > M_1$ . Угловую скорость вращения бинарной системы ω примем равной 1, а за единицу измерения координат и расстояний примем расстояние d между частицами, образующими бинарную систему. При этом массовый параметр бинарной

системы  $\mu = \frac{M_2}{M_1 + M_2}$ , а ее зарядовый параметр  $q = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2}$ .

Проекция на ось Z вектора обобщенной циклотронной частоты бинарной системы:

$$\omega_{\chi} = \frac{Q_1 + Q_2}{M_1 + M_2} B_z \frac{1}{\omega}.$$
 (1)

Здесь заряды, массы, индукция магнитного поля, а также угловая скорость вращения бинарной системы ю выражены в одной и той же системе единиц, а  $\omega_{\gamma}$  – безразмерна.

Проекция на ось Z вектора циклотронной частоты малой частицы

$$\omega_{*\chi} = \omega_{\chi} \Omega , \qquad (2)$$

где 
$$\Omega = \frac{Q/M}{(Q_1 + Q_2)/(M_1 + M_2)}$$
 (3)

суть приведенный удельный заряд малой частицы.

Эффективные коэффициенты электромагнитной редукции масс первой и второй частиц, образующих бинарную систему, соответственно равны [2]

$$\lambda_{*1} = -\frac{1-q}{1-\mu} \Omega \psi \quad \text{i} \quad \lambda_{*2} = -\frac{q}{\mu} \Omega \psi , \qquad (4)$$

где 
$$\psi = -\frac{\left[\mu + q\omega_{\chi}\right]\left[\left(1-\mu\right) + \omega_{\chi}\left(1-q\right)\right]}{q\left(1-q\right)\left(1+\omega_{\chi}\right)}$$
. (5)

Как показано в [2], система динамических уравнений, описывающих движение малой частицы в синодической системе координат, имеет вил:

$$\begin{cases} \frac{d^{2}x}{dt^{2}} - (2 + \omega_{*\chi})\frac{dy}{dt} = f(x, y, z); \\ \frac{d^{2}y}{dt^{2}} + (2 + \omega_{*\chi})\frac{dx}{dt} = g(x, y, z); \\ \frac{d^{2}z}{dt^{2}} = p(x, y, z), \end{cases}$$
(6)

где 
$$f(x, y, z) = (1 + \omega_{*\chi}) x - \lambda_{*1} (1 - \mu) \frac{x - x_1}{r_1^3} - \lambda_{*2} \mu \frac{x - x_2}{r_2^3};$$
 (7)

$$g(x, y, z) = (1 + \omega_{*\chi})y - \lambda_{*1}(1 - \mu)\frac{y}{r_1^3} - \lambda_{*2}\mu\frac{y}{r_2^3};$$
(8)

$$p(x, y, z) = -\lambda_{*1} \left( 1 - \mu \right) \frac{z}{r_1^3} - \lambda_{*2} \mu \frac{z}{r_2^3}, \quad (9)$$

где, в свою очередь,

$$x_{1} = \frac{\mu + q\omega_{\chi}}{1 + \omega_{\chi}}; \quad x_{2} = -\frac{(1 - \mu) + (1 - q)\omega_{\chi}}{1 + \omega_{\chi}}; \quad (10)$$

$$r_{1} = \sqrt{(x - x_{1})^{2} + y^{2} + z^{2}};$$

$$r_{2} = \sqrt{(x - x_{2})^{2} + y^{2} + z^{2}}. \quad (11)$$

Допустим, что малая частица может стационарно базироваться в ортопланарной тригональной точке либрации (ОТТЛ) [2] с координатами (x, 0, z). Выясним, в каком случае движение малой частицы в окрестности данной ОТТЛ будет устойчивым.

# Критерий устойчивости движения в окрестности ортопланарной тригональной точки либрации

В точке либрации (x, 0, z) по определению имеем:

$$f(x,0,z) = p(x,0,z) = g(x,0,z) = 0.$$
 (12)

Сообщим малой частице, находящейся в точке либрации, малые смещения вдоль координатных осей: *x'*, *y'*, *z'*. При этом координаты малой частицы станут равными

$$\begin{cases} x = x + x'; \\ y = y'; \\ z = z + z'. \end{cases}$$
(13)

В таком случае, согласно (6), имеем:

$$\begin{cases} \frac{d^{2} x'}{dt^{2}} - \left(2 + \omega_{*\chi}\right) \frac{d y'}{dt} = f\left(x + x', y', z + z'\right); \\ \frac{d^{2} y'}{dt^{2}} + \left(2 + \omega_{*\chi}\right) \frac{d x'}{dt} = g\left(x + x', y', z + z'\right); \\ \frac{d^{2} z'}{dt^{2}} = p\left(x + x', y', z + z'\right) \end{cases}$$
(14)

Осуществляя разложение правых частей уравнений (14) в ряды Тейлора в точке либрации, ограничиваясь первыми четырьмя членами разложения, напишем:

$$\begin{cases} \frac{d^{2} x'}{dt^{2}} - \left(2 + \omega_{*\chi}\right) \frac{dy'}{dt} = \left[\frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{(x,0,z)}\right] x' + \left[\frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{(x,0,z)}\right] y' + \left[\frac{\partial f}{\partial z}\Big|_{(x,0,z)}\right] z'; \\ \frac{d^{2} y'}{dt^{2}} + \left(2 + \omega_{*\chi}\right) \frac{dx'}{dt} = \left[\frac{\partial g}{\partial x}\Big|_{(x,0,z)}\right] x' + \left[\frac{\partial g}{\partial y}\Big|_{(x,0,z)}\right] y' + \left[\frac{\partial g}{\partial z}\Big|_{(x,0,z)}\right] z'; \quad (15)$$
$$\frac{d^{2} z'}{dt^{2}} = \left[\frac{\partial p}{\partial x}\Big|_{(x,0,z)}\right] x' + \left[\frac{\partial p}{\partial y}\Big|_{(x,0,z)}\right] y' + \left[\frac{\partial p}{\partial z}\Big|_{(x,0,z)}\right] z'.$$

Найдем частные производные функций (7)– (9) в ОТТЛ с координатами (x, 0, z).

$$\frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{(x,0,z)} = (1+\omega_{*\chi}) - \lambda_{*1}(1-\mu)\frac{1}{r_1^3} - \lambda_{*2}\mu\frac{1}{r_2^3} + 3\lambda_{*1}(1-\mu)\frac{(x-x_1)^2}{r_1^5} + 3\lambda_{*2}\mu\frac{(x-x_2)^2}{r_2^5}.$$
 (16)

Поскольку, согласно (12), p(x, 0, z) = 0, то, как следует из (9), имеет место уравнение

$$\lambda_{*1} \left( 1 - \mu \right) \frac{1}{r_1^3} + \lambda_{*2} \mu \frac{1}{r_2^3} = 0.$$
 (17)

В [2] показано, что расстояния ОТТЛ от первой и второй частиц, образующих бинарную систему, соответственно определяются выражениями

$$r_1 = \sqrt[3]{-\lambda_{*1} \frac{1-\mu}{(1+\omega_{*\chi})x}};$$
 (18)

$$r_2 = \sqrt[3]{\lambda_{*2} \frac{\mu}{(1 + \omega_{*\chi})x}}; \qquad (19)$$

Из (18) и (19) следует, что эффективные коэффициенты электромагнитной редукции масс

первой и второй частиц соответственно равны

$$\lambda_{*1} = -\frac{1 + \omega_{*\chi}}{1 - \mu} x r_1^3; \qquad (20)$$

$$\lambda_{*2} = \frac{1 + \omega_{*\chi}}{\mu} x r_2^3. \tag{21}$$

Подставляя (20) и (21) в (16), учитывая (17), приходим к следующему выражению:

$$\frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{(x, 0, z)} = (1 + \omega_{*\chi}) - 3(1 + \omega_{*\chi}) x \frac{(x - x_1)^2}{r_1^2} + 3(1 + \omega_{*\chi}) x \frac{(x - x_2)^2}{r_2^2} = = (1 + \omega_{*\chi}) + 3(1 + \omega_{*\chi}) x z^2 \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2}\right) = = (1 + \omega_{*\chi}) \left[1 + 3\frac{xz^2(2x - x_1 - x_2)}{r_1^2 r_2^2}\right] = (1 + \omega_{*\chi}) \left[1 + 3\frac{xz^2(2x - 2x_1 - 1)}{r_1^2 r_2^2}\right]. \quad (22)$$

В таком случае, для частных производных имеем выражения:

$$\frac{\partial f}{\partial z}\Big|_{(x,0,z)} = 3\lambda_{*1}(1-\mu)\frac{(x-x_1)z}{r_1^5} + 3\lambda_{*2}\mu\frac{(x-x_2)z}{r_2^5} = = 3(1+\omega_{*\chi})xz\bigg(\frac{x-x_2}{r_2^2} - \frac{x-x_1}{r_1^2}\bigg) = 3(1+\omega_{*\chi})xz\frac{z^2 - (x-x_2)(x-x_1)}{r_1^2 r_2^2} = = 3(1+\omega_{*\chi})xz\frac{z^2 - (x-x_1+1)(x-x_1)}{r_1^2 r_2^2}; \quad (23)$$

$$\frac{\partial g}{\partial y}\Big|_{(x, 0, z)} = \left(1 + \omega_{*\chi}\right) - \lambda_{*1}\left(1 - \mu\right)\frac{1}{r_1^3} - \lambda_{*2}\mu\frac{1}{r_2^3} = \left(1 + \omega_{*\chi}\right);$$
(24)

$$\frac{\partial p}{\partial x}\Big|_{(x,0,z)} = 3\lambda_{*1} (1-\mu) \frac{(x-x_1)z}{r_1^5} + 3\lambda_{*2} \mu \frac{(x-x_2)z}{r_2^5} = \frac{\partial f}{\partial z}\Big|_{(x,0,z)};$$
(25)

$$\frac{\partial p}{\partial z}\Big|_{(x,0,z)} = -\lambda_{*1}(1-\mu)\frac{1}{r_1^3} - \lambda_{*2}\mu\frac{1}{r_2^3} + 3\lambda_{*1}(1-\mu)\frac{z^2}{r_1^5} + 3\lambda_{*2}\mu\frac{z^2}{r_2^5} = \\ = -3(1+\omega_{*\chi})\frac{xz^2}{r_1^2} + 3(1+\omega_{*\chi})\frac{xz^2}{r_2^2} = 3(1+\omega_{*\chi})xz^2\left(\frac{1}{r_2^2}-\frac{1}{r_1^2}\right) = (1+\omega_{*\chi})-\frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{(x,0,z)}; \quad (26)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{(x,0,z)} = \frac{\partial g}{\partial x}\Big|_{(x,0,z)} = \frac{\partial g}{\partial z}\Big|_{(x,0,z)} = \frac{\partial p}{\partial y}\Big|_{(x,0,z)} = 0.$$
(27)

Введем обозначения:

$$\gamma = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{(x, 0, z)}; \quad \delta = \frac{\partial f}{\partial z}\Big|_{(x, 0, z)}.$$
 (28)

В таком случае (15) перепишется в виде:

$$\begin{cases} \frac{d^{2} x'}{dt^{2}} - (2 + \omega_{*\chi}) \frac{d y'}{dt} = \gamma x' + \delta z'; \\ \frac{d^{2} y'}{dt^{2}} + (2 + \omega_{*\chi}) \frac{d x'}{dt} = (1 + \omega_{*\chi}) y'; \\ \frac{d^{2} z'}{dt^{2}} = \delta x' + [(1 + \omega_{*\chi}) - \gamma] z' \end{cases}.$$
(29)

ИЗВЕСТИЯ ВолгГТУ

Система (29) суть система зацепляющихся дифференциальных уравнений. Будем искать ее решение в виде

$$x' = A \exp(\sigma t); \quad y' = B \exp(\sigma t);$$
$$z' = C \exp(\sigma t). \quad (30)$$

Подставляя эти выражения в (29), приходим к системе характеристических уравнений

$$\begin{cases} (\sigma^{2} - \gamma)A - (2 + \omega_{*\chi})\sigma B - \delta C = 0; \\ (2 + \omega_{*\chi})\sigma A + [\sigma^{2} - (1 + \omega_{*\chi})]B = 0; \\ \delta A + [(1 + \omega_{*\chi}) - \gamma - \sigma^{2}]C = 0. \end{cases}$$
(31)

Система (31) имеет нетривиальное решение в том случае, если справедливо секулярное уравнение

)

$$\det A = 0, \tag{32}$$

$$A = \begin{pmatrix} \left(\sigma^{2} - \gamma\right) & -\left(2 + \omega_{*\chi}\right)\sigma & -\delta \\ \left(2 + \omega_{*\chi}\right)\sigma & \left[\sigma^{2} - \left(1 + \omega_{*\chi}\right)\right] & 0 \\ \delta & 0 & \left[\left(1 + \omega_{*\chi}\right) - \gamma - \sigma^{2}\right] \end{pmatrix},$$
(33)

где

т. е. справедливо уравнение

$$\begin{pmatrix} \sigma^{2} - \gamma \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 + \omega_{*\chi} \end{pmatrix} \sigma & -\delta \\ \begin{pmatrix} 2 + \omega_{*\chi} \end{pmatrix} \sigma & \left[ \sigma^{2} - \begin{pmatrix} 1 + \omega_{*\chi} \end{pmatrix} \right] & 0 \\ \delta & 0 & \left[ \begin{pmatrix} 1 + \omega_{*\chi} \end{pmatrix} - \gamma - \sigma^{2} \right] \end{vmatrix} = 0.$$
 (34)

Раскрывая определитель, приходим к выражению

$$\Delta = \left[\sigma^{2} - (1 + \omega_{*\chi})\right]\delta^{2} + \left[(1 + \omega_{*\chi}) - \gamma - \sigma^{2}\right]\left\{\left(\sigma^{2} - \gamma\right)\left[\sigma^{2} - (1 + \omega_{*\chi})\right] + (2 + \omega_{*\chi})^{2}\sigma^{2}\right\}.$$
 (35)

u

Вводя в рассмотрение величину

$$\equiv \sigma^2 - 1, \tag{36}$$

перепишем (35) в виде

$$\Delta = (u + \omega_{*\chi})\delta^{2} + (\omega_{*\chi} - u - \gamma)\left[(u + 1 - \gamma)(u - \omega_{*\chi}) + (2 + \omega_{*\chi})^{2}(1 + u)\right] = \\ + (\omega_{*\chi} - u - \gamma)\left[(u + 1 - \gamma)(u - \omega_{*\chi}) + (2 + \omega_{*\chi})^{2}(1 + u)\right] = \\ = \delta^{2}u + \delta^{2}\omega_{*\chi} + (\omega_{*\chi} - u - \gamma)\left[u^{2} + (1 - \gamma + \omega_{*\chi})u + (1 - \gamma)\omega_{*\chi} + (2 + \omega_{*\chi})^{2}u + (2 + \omega_{*\chi})^{2}\right] = \\ = \delta^{2}u + \delta^{2}\omega_{*\chi} - u^{3} - (1 - \gamma + \omega_{*\chi})u^{2} - (1 - \gamma)\omega_{*\chi}u - \\ - (2 + \omega_{*\chi})^{2}u^{2} - (2 + \omega_{*\chi})^{2}u + (\omega_{*\chi} - \gamma)u^{2} + (1 - \gamma + \omega_{*\chi})(\omega_{*\chi} - \gamma)u + \\ + (1 - \gamma)(\omega_{*\chi} - \gamma)\omega_{*\chi} + (2 + \omega_{*\chi})^{2}(\omega_{*\chi} - \gamma)u + (2 + \omega_{*\chi})^{2}(\omega_{*\chi} - \gamma) = -u^{3} - \Xi_{1}u^{2} + \Xi_{2}u + \Xi_{3}, \quad (37)$$
  
где 
$$\Xi_{1} = \left[(2 + \omega_{*\chi})^{2} + 1\right] = 5 + 4\omega_{*\chi} + \omega_{*\chi}^{2}; \quad (38)$$

$$\Xi_{2} = \delta^{2} - (1 - \gamma)\omega_{*\chi} - (2 + \omega_{*\chi})^{2} + (1 - \gamma + \omega_{*\chi})(\omega_{*\chi} - \gamma) + (2 + \omega_{*\chi})^{2}(\omega_{*\chi} - \gamma) = \\ = \delta^{2} - \omega_{*\chi} + \gamma\omega_{*\chi} - 4 - 4\omega_{*\chi} - \omega_{*\chi}^{2} + \omega_{*\chi} - \gamma\omega_{*\chi} + \omega_{*\chi}^{2} - \gamma + \gamma^{2} - \gamma\omega_{*\chi} + 4\omega_{*\chi} + \\ + 4\omega_{*\chi}^{2} + \omega_{*\chi}^{3} - 4\gamma - 4\gamma\omega_{*\chi} - \gamma\omega_{*\chi}^{2} = (\delta^{2} + \gamma^{2} - 5\gamma - 4) + \omega_{*\chi}(-1 + \gamma - 4 + 1 - \gamma - \gamma + 4 - 4\gamma) + \\ + \omega_{*\chi}^{2}(-1 + 1 + 4 - \gamma) + \omega_{*\chi}^{3} = (\delta^{2} + \gamma^{2} - 5\gamma - 4) - 5\gamma\omega_{*\chi} + (4 - \gamma)\omega_{*\chi}^{2} + \omega_{*\chi}^{3}; \quad (39)$$

$$\Xi_{3} = \delta^{2} \omega_{*\chi} + (1 - \gamma) (\omega_{*\chi} - \gamma) \omega_{*\chi} + (2 + \omega_{*\chi})^{2} (\omega_{*\chi} - \gamma) = = \delta^{2} \omega_{*\chi} + (\omega_{*\chi} - \gamma - \gamma \omega_{*\chi} + \gamma^{2}) \omega_{*\chi} + (4 + 4\omega_{*\chi} + \omega_{*\chi}^{2}) (\omega_{*\chi} - \gamma) = = \delta^{2} \omega_{*\chi} + \omega_{*\chi}^{2} - \gamma \omega_{*\chi} - \gamma \omega_{*\chi}^{2} + \gamma^{2} \omega_{*\chi} + 4\omega_{*\chi} + 4\omega_{*\chi}^{2} + \omega_{*\chi}^{3} - 4\gamma - 4\gamma \omega_{*\chi} - \gamma \omega_{*\chi}^{2} = = -4\gamma + \omega_{*\chi} (\delta^{2} - \gamma + \gamma^{2} + 4 - 4\gamma) + \omega_{*\chi}^{2} (1 - \gamma + 4 - \gamma) + \omega_{*\chi}^{3} = = -4\gamma + (\delta^{2} + \gamma^{2} - 5\gamma + 4) \omega_{*\chi} + (5 - 2\gamma) \omega_{*\chi}^{2} + \omega_{*\chi}^{3}.$$
 (40)

Подставляя (38)-(40) в (37), приходим к выражению

$$\Delta = -u^{3} - \left(5 + 4\omega_{*\chi} + \omega_{*\chi}^{2}\right)u^{2} - \left[\left(4 + 5\gamma - \delta^{2} - \gamma^{2}\right) + 5\gamma\omega_{*\chi} + (\gamma - 4)\omega_{*\chi}^{2} - \omega_{*\chi}^{3}\right]u - \left[4\gamma + \left(5\gamma - 4 - \delta^{2} - \gamma^{2}\right)\omega_{*\chi} + (2\gamma - 5)\omega_{*\chi}^{2} - \omega_{*\chi}^{3}\right].$$
(41)

При этом секулярное уравнение может быть записано в виде:

$$u^{3} + (5 + 4\omega_{*\chi} + \omega_{*\chi}^{2})u^{2} + \left[ (4 + 5\gamma - \delta^{2} - \gamma^{2}) + 5\gamma\omega_{*\chi} + (\gamma - 4)\omega_{*\chi}^{2} - \omega_{*\chi}^{3} \right]u + \left[ 4\gamma + (5\gamma - 4 - \delta^{2} - \gamma^{2})\omega_{*\chi} + (2\gamma - 5)\omega_{*\chi}^{2} - \omega_{*\chi}^{3} \right] = 0.$$
 (42)

Согласно теории устойчивости движения Ляпунова, малая частица будет обладать устойчивым движением, если  $\sigma = a + ib$ ,

малой частицы будет соответствовать случай, когда все три корня *и* уравнения (42) будут действительными величинами, меньшими –1.

# Выводы

где *a* < 0

Поскольку, согласно (34),

$$\sigma = \pm \sqrt{u+1}, \qquad (43)$$

Подводя итог вышеизложенному, можем констатировать, что критерий устойчивости ОТТЛ с координатами (x, 0, z) может быть представлен в виде [2]:

то, очевидно, случаю устойчивого движения ма-

$$\begin{cases} q(1-q) < 0; \\ \omega_{\chi} \in (-\infty; -1) \cup \left( -\max\left(\frac{1-\mu}{1-q}; \frac{\mu}{q}\right); -\min\left(\frac{1-\mu}{1-q}; \frac{\mu}{q}\right) \right). \\ u^{3} + \left(5 + 4\omega_{*\chi} + \omega_{*\chi}^{2}\right) u^{2} + \left[ \left(4 + 5\gamma - \delta^{2} - \gamma^{2} \right) + 5\gamma\omega_{*\chi} + (\gamma - 4)\omega_{*\chi}^{2} - \omega_{*\chi}^{3} \right] u + \\ + \left[ 4\gamma + \left(5\gamma - 4 - \delta^{2} - \gamma^{2} \right) \omega_{*\chi} + (2\gamma - 5)\omega_{*\chi}^{2} - \omega_{*\chi}^{3} \right] = 0; \\ u < -1; \\ \gamma = \left(1 + \omega_{*\chi}\right) \left[ 1 + 3\frac{xz^{2}(2x - 2x_{1} - 1)}{n_{1}^{2}r_{2}^{2}} \right]; \\ \delta = 3\left(1 + \omega_{*\chi}\right) xz \frac{z^{2} - (x - x_{1} + 1)(x - x_{1})}{n_{1}^{2}r_{2}^{2}}; \\ x_{1} = \frac{\mu + q\omega_{\chi}}{1 + \omega_{\chi}}; \\ r_{1} = \sqrt{(x - x_{1})^{2} + z^{2}}; \\ w_{*\chi} = \omega_{\chi}\Omega. \end{cases}$$

ИЗВЕСТИЯ ВолгГТУ

Этот критерий при «выключенном» внешнем магнитном поле, когда  $\omega_{\chi} = 0$ , переходит

в установленный ранее критерий устойчивости ОТТЛ [3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронин, П. В. Стационарные состояния бинарной системы электрически заряженных частиц во внешнем ортогональном магнитном поле / П. В. Воронин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3(51) / ВолгГТУ. – Вол-

гоград, 2009. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь»; вып. 3). – С. 19–23.

2. Воронин, П. В. Точки либрации в пространстве бинарной системы, стабилизированной во внешнем ортогональном магнитном поле / П. В. Воронин // Известия Волг-ГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3(63) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь»; вып. 4). – С. 17–23.

3. Воронин, П. В. Трехмерная ограниченная задача трех тел в условиях кулоновского и радиационного электромагнитного взаимодействия : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / П. В. Воронин. – Волгоград, 2007. – 19 с.

# \_\_\_ ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА \_\_\_\_ И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.315.611:537.226.2

A. O. Литинский, Нгуен Тхи Ша A. O. Litinski, Nguyen Thi Sa

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ЭЛЕКТРОНОВ И ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ОДНОСЛОЙНЫХ ГИДРОКСИСИЛОКСАНОВЫХ СТРУКТУР С ДЕФЕКТАМИ ЗАМЕЩЕНИЯ СИЛАНОЛЬНЫХ ГРУПП ЭЛЕКТРОНОДОНОРНЫМИ АТОМАМИ

# ELECTRON ENERGY SPECTRUM AND PECULIARITIES OF OPTICAL ABSORPTION OF SINGLE-LAYER HYDROXYSILOXANE STRUCTURES WITH SUBSTITUTION DEFECTS OF SILANOL GROUPS BY ELECTRON-DONOR ATOMS

# Волгоградский государственный технический университет Volgograd State Technical University

E-mail: litinski@inbox.ru; nguyensa@mail.ru

Вычислительная схема, основанная на теории функционала плотности, обобщенная для случая периодических структур, применена для расчета электронно-энергетических характеристик двумерных гидроксисилоксановых структур, как идеального строения, так и с дефектами замещения силанольных групп атомами V-й группы (N, P, As). Проанализированы зависимости параметров энергетических зон и спектров оптического поглощения (в интервале энергий поглощаемых фотонов  $\hbar \omega < 17$  эВ) от концентрации введенного дефекта. Выявлена природа «примесных» подзон (и оптических переходов с их участием), появляющихся в области запрещенных (в случае идеальной структуры) энергий электронов. Полученные результаты могут быть полезными для подбора пленочных материалов для микро- и наноэлектронных приборов с требуемым энергетическим спектром электронов.

*Ключевые слова*: теория функционала плотности, двумерные диэлектрические структуры, дефекты замещения в двумерных структурах, энергетический спектр электронов, спектр оптического поглощения в двумерных диэлектрических структурах с дефектами замещения.

The computation scheme based on density functional theory and generalized for the case of periodic structures is used to calculate the electron-energy characteristics of two-dimensional hydroxysiloxane structures as an ideal structure and with substitution defects of silanol groups by group V atoms (N, P, As). The dependences of the parameters of the energy bands and optical absorption spectra (in the energy range of the absorbed photons  $\hbar\omega < 17$  eV) on the concentration of defects were analyzed. The nature of «impurity» subzones (and of optical transitions with their participation) appeared in the electron energy forbidden zone (in the case of the ideal structure) was revealed. The results may be useful for the selection of film materials for micro- and nanoelectronic devices with the desired electron energy spectrum.

*Keywords*: density functional theory, two-dimensional dielectric structures, substitution defects in twodimensional structures, the electron energy spectrum, optical absorption spectrum in two-dimensional dielectric structures with substitution defects.

Двумерные структуры на основе диоксида кремния интересны в связи с возможностью их применения в качестве активных материалов элементов микро- и наноэлектронной техники [1, 2]. Их можно представить как выделенные слои структуры β-кристоболита или β-тридимита (их структуры отличаются так же, как структуры вюртципа и сфалрита), разорванные кремний-кислородные связи которых (они направлены перпендикулярно соответствующей поверхности) замкнуты атомами водорода с образованием поверхностных силанольных групп. Несмотря на то, что синтез такого типа слоистых гидроксисилоксаноых структур проблематичен, они могут обладать уникальными электронно-энергетическими характеристиками благодаря их низкой размерности [3].



Рис. 1. Однослойная двумерная структура на основе диоксида кремния: a – элемент однослойной двумерной структуры в виде элементарной ячейки, содержащей  $N'=3\times3=9$  примитивных ячеек, атомы и поверхностные OH-группы одной из которых пронумерованы числами 1÷7 ( $\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2$  – основные векторы трансляции примитивной ячейки);  $\delta$  – зона Бриллюэна двумерной гексагональной структуры

Выделенная таким путем однослойная двумерная гидроксисилоксановая (ДГС) структура представлена на рис. 1, *а*. Ее примитивная ячейка имеет состав Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(OH)<sub>2</sub>, а структурная формула двумерного однослойного мотива может быть представлена в виде схемы на рис. 2, *а*. Кроме «чистой» ДГС-структуры авторами рассмотрены «дефектные» структуры, отличающиеся тем, что в некоторых ДГС- ячейках силанольные группы замещены  $D^{V}$ -атомами ( $D^{V} \equiv N$ , Р, As) с неподеленными парами электронов. Соответствующие «дефектные» ячейки имеют состав SiO<sub>3</sub>(OH)D<sup>V</sup> и структурную формулу, приведенную на рис. 2,  $\delta$ . Концентрацию дефекта будем характеризовать индексом *m*, равным числу примитивных ячеек, в которых проведено замещение, приходящееся на элементарную ячейку, состоящую из  $N'=3\times3=9$ примитивных ячеек (см. ниже)).



Рис. 2. Формулы, отражающие состав и строение: *а* – двумерного гидроксисилоксанового мотива (формально п→∞) и б – ее примитивной ячейки, в которой проведено замещение силанольной группы на D<sup>v</sup>-атомы

Для расчета бездефектной ДГС-структуры исходили из расширенной ячейки, содержащей  $N"=3\times3=9$  элементарных ячеек, каждая из которых включает в себя  $N'=3\times3=9$  примитивных ячеек (рис. 1, *a*). На расширенную ячейку накладывались циклические граничные условия, что эквивалентно тому, что состояния электронов рассчитывались в  $\tilde{N} = N' \times N" = 9 \times 9 = 81$  **k** -точках зоны Бриллюэна (рис. 1, *б*), равномерно распределенных вдоль осей симметрии пространства обратной решетки; причем симметричные точки **k** представлены всей своей звездой:

$$\mathbf{k}_{n_1n_2} = \frac{n_1}{N'} \mathbf{b}_1 + \frac{n_2}{N'} \mathbf{b}_2$$

( $\mathbf{b}_1$  и  $\mathbf{b}_2$  – векторы трансляции обратной решетки (связанные с векторами трансляции примитивной ячейки прямой решетки  $\mathbf{t}_1$ ,  $\mathbf{t}_2$  (см. рис. 1, *a*) условием  $\mathbf{t}_i \mathbf{b}_j = 2\pi \delta_{ij}$  (*i*, *j* = 1,2;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера));  $n_1$  и  $n_2$  – целые числа, удовлетворяющие условию  $0 \le n_1 \le \widetilde{N}$  и  $0 \le n_2 \le \widetilde{N}$ ). В нашем случае векторы трансляции  $\mathbf{t}_1$  и  $\mathbf{t}_2$  в три раза короче векторов трансляции  $\mathbf{t}_1'$  и  $\mathbf{t}_2'$  элементарной ячейки, т. е.  $\mathbf{t}_1' = 3\mathbf{t}_1$  и  $\mathbf{t}_2' = 3\mathbf{t}_2$ . Отметим, что конкретные расчеты показали, что переход к расширенной ячейке большего размера не приводит к заметному изменению результатов расчета. Волновые функции электронов

в промежуточных точках зоны Бриллюэна оценивались путем интерполяции. Сетка для численного интегрирования по пространственным координатам выбиралась с таким количеством узлов, которое обеспечивало бы отсекание в разложении волновой функции по плоским волнам таких волн, энергия которых составляет более 300 Ry [4].

Расчеты всех ДГС-структур проведены с полной оптимизацией геометрии с использованием процедуры на основе теории функционала плотности, обобщенной на случай систем с трансляционной симметрией (программный пакет SIESTA [5, 6]), в базисе валентных двухэкспонентных псевдоорбиталей с включением поляризационных функций, орбитальное квантовое число которых такое же, как у валентных орбиталей (DZP-базис). Использован обменно-корреляционный по-тенциал градиентного типа Пердью – Бурке – Эрн-зерхофа [7]. Влияние остовных электронов учитывалось путем введения псевдопотенциала типа Труллье – Мартинсона – Клейнмана – Баландера [8, 9].



Рис. 3. Дисперсионные кривые ε(k), плотности одноэлектронных состояний η(ε) и спектры оптического поглощения ε<sub>2</sub>(ħω), обусловленные переходами электронов из 2*p*-валентной зоны в зону вакантных состояний или на вакантные состояния, обусловленные дефектами замещения (пунктиром отмечено положение уровня химического потенциала μ; нумерация 1–10 согласно рис. 4):

*а* – для бездефектной структуры (*m* = 0); *б*, *в* и *г* – для N-, P- и As-замещенных структур соответственно (для случая *m* = 3)

Полученные дисперсионные кривые  $\varepsilon(\mathbf{k})$ , плотности электронных состояний  $\eta(\varepsilon)$  и зависимости мнимой части диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_2$  от энергии поглощенных фотонов  $\hbar\omega$  представлены на рис. 3. Общая схема энергетических зон электронов приведена на рис. 4, а зависимость энергетических характеристик энергетического спектра электронов от концентрации *m* дефектов замещения – на рис. 5. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1) при замещении силанольной группы ДГС-структуры на D<sup>V</sup>-атомы наиболее устойчивым оказывается N-замещенная структура (уровень химического потенциала (рис. 5) смещается по сравнению с незамещенной структурой ( $\mu_{\text{Si-OH}} \approx -2,0$  эВ) в область более низких энергий ( $-3,7 \div -4,0$  эВ) на величину  $\approx 1,7$  эВ (m = 1)  $\div 2,0$  эВ (m = 6)). Что касается P- и Asзамещенных структур, то для них величина  $\mu$  по сравнению с  $\mu_{Si-OH}$  не претерпевает значительных изменений ( $\Delta \mu = 0,1$  и 0,3 эВ (m = 1) и  $\Delta \mu = -0,1$  и 0,6 эВ (m = 6) для Р- и Аз-замещений соответственно). Тенденция зависимости  $\mu$ от атома-заместителя и его концентрации позволяет судить об электронодонорной (электроноэмиссионной) способности (ЭДС) поверхности рассматриваемых структур. В соответствии с рис. 5, ЭДС убывает в ряду Аs, Р, N, причем у N-замещенных структур она намного ниже, и для каждой D<sup>V</sup>-структуры ЭДС слабо убывает для N- и P-структур и слабо возрастает для Asструктур;



Рис. 4. Схема оптического спектра электронов ДГС структур как бездефектной, так и с дефектами замещения (стрелками 1÷10 обозначены возможные электронные переходы; І – валентная 2s-зона; ІІ – низкоэнергетическая 2p-подзона ( $\varepsilon_p^{(3)}$  и  $\varepsilon_p^{(4)}$  – ее верхняя и нижняя границы;  $\Delta \varepsilon_p^{(3;4)}$  – ширина); ІІІ – высокоэнергетическая 2p-подзона ( $\varepsilon_p^{(1)}$  и  $\varepsilon_p^{(2)}$  – ее верхняя границы,  $\Delta \varepsilon_p^{(1;2)}$  – ширина); ІІІ – высокоэнергетическая 2p-подзона ( $\varepsilon_p^{(1)}$  и  $\varepsilon_p^{(2)}$  – ее верхняя границы,  $\Delta \varepsilon_p^{(1;2)}$  – ширина); ІV – зона вакантных состояний ( $\varepsilon_c$  – ее нижняя граница);  $\varepsilon_c$  и  $\varepsilon_p$ ,  $\varepsilon_p^*$ ,  $\varepsilon_{sp}^*$  – подзоны вакантных и заполненных состояний соответственно, обусловленные дефектами замещения;  $\mu$  – положение уровня химического потенциала

2) оптимизированные длины связей (R(Si– O)=1,65 Å, R(N–O)=1,47 Å, R(P–O)=1,69 Å, R(As–O)=1,82 Å) и валентные углы при атомах Si и D<sup>V</sup> ( $\angle$ OSiO  $\approx$  105°÷112°;  $\angle$ ONO  $\approx$ 99°÷108°;  $\angle$ OPO  $\approx$  97°÷99°;  $\angle$ OAsO  $\approx$ 95°÷98°) соответствуют средним экспериментальным значениям этих величин в родственных как кристаллических, так и низкомолекулярных структурах [10];

3) энергетические уровни є валентных электронов двумерных гидроксисилоксановых структур группируются (рис. 4) в виде зон занятых состояний (I÷III, рис. 4), для которых  $\varepsilon < \mu$ , и зоны (IV) вакантных состояний, для которых  $\varepsilon > \mu$ (µ – уровень химического потенциала). В занятые состояния преимущественный вклад вносят орбитали атомов кислорода и D<sup>V</sup>-атомов, а в вакантные состояния - орбитали атомов кремния и разрыхляющие орбитали связей D<sup>V</sup>-O. Валентная зона подразделяется на три подзоны, в нижнюю по энергии из которых (I) преимущественный вклад вносят валентные ns-орбитали атомов О и  $D^V$ , а в зоны с более высокими энергиями (II, III) основной вклад вносят орбитали неподеленных пар атомов кислорода и D<sup>V</sup>-атомов (верхняя валентная *пр*-зона (III)), и связывающие орбитали Si-O и DV-O связей (нижняя валентная *пр*-зона (II));

4) для бездефектной ДГС-структуры  $\Delta \epsilon_g$  – ширина области запрещенных энергий (между  $\varepsilon_p^{(1)}$  – верхней границей *пр*-подзоны и  $\varepsilon_c$  – нижней границей области вакантных состояний) составляет ~ 6,3 эВ и эта величина входит в диапазон ширин запрещенных зон различных модификаций кристаллических SiO<sub>2</sub>-структур [11-14]. Тем не менее, следует отметить, что численные оценки величин Δε<sub>g</sub> могут оказаться заниженными, что характерно для DFT-расчетов вследствие «эффектов самодействия», типичных для методов DFT, приводящих к смещению энергий вакантных состояний в область меньших энергий [15, 16]. При D<sup>V</sup>-замещении энергия є (рис. 5) нижней границы области вакантных состояний смещается в область больших энергий, причем  $\varepsilon_c(Si-OH) < \varepsilon_c(P) < \varepsilon_c(N) <$ ε<sub>c</sub>(As) и для каждой из замещенных структур с ростом концентрации *m* дефекта энергия  $\varepsilon_c$ увеличивается от  $\simeq 0.3$  эВ до  $\simeq 0.8$  эВ (для  $D^{V} \equiv P$ ), от  $\simeq 0.3$  эВ до  $\simeq 1.1$  эВ (для  $D^{V} \equiv N$ ) и от  $\approx 0.35$  эВ до  $\approx 1.2$  эВ (для  $D^{V} \equiv As$ ); 5) энергия верхней  $\varepsilon_{p}^{(1)}$  и нижней  $\varepsilon_{p}^{(2)}$  (рис. 5)

5) энергия верхней  $\varepsilon_p^{(2)}$  и нижней  $\varepsilon_p^{(2)}$  (рис. 5) границы III-*np*-подзоны, состояния электронов для которой обусловлены неподеленными парами электронов атомов О, N, P, As, с ростом концентрации дефекта монотонно смещаются в область более высоких энергий в случае Asзамещения и почти не изменяются или слабо перемещаются в область меньших энергий в случае P- и N-замещения, при этом  $\varepsilon_p^{(2)}(As) >$ > $\varepsilon_p^{(2)}(P) > \varepsilon_p^{(2)}(N)$  для всех концентраций *m*, а  $\varepsilon_p^{(1)}(\mathbf{P}) < \varepsilon_p^{(1)}(\mathbf{N}) \simeq \varepsilon_p^{(1)}(\mathbf{As})$ для m = 1; 3 и  $\varepsilon_p^{(1)}(\mathbf{P}) \simeq \simeq \varepsilon_p^{(1)}(\mathbf{N}) \ll \varepsilon_p^{(1)}(\mathbf{As})$ для m = 6. Это приводит к тому, что ширина  $\Delta \varepsilon_p^{(1;2)}$  III-*пр*-подзоны оказывается существенно большей в случае N-замещения, по сравнению со случаями P- и As-замещений. Особенно широкой  $\Delta \varepsilon_p^{(1;2)}(N)$  оказывается при m=2 ( $\simeq 3,5$  эВ);



Рис. 5. Зависимость величин  $\varepsilon_p^{(1)}$ ,  $\varepsilon_p^{(2)}$ ,  $\Delta \varepsilon_p^{(1;2)}$ ,  $\varepsilon_p^{(3)}$ ,  $\varepsilon_p^{(4)}$ ,  $\Delta \varepsilon_p^{(3;4)}$ ,  $\mu$ ,  $\varepsilon_c$ ,  $\varepsilon_c$ ,  $\varepsilon_p^{'}$ ,  $\varepsilon_p^{'}$ ,  $\varepsilon_p^{'}$ ,  $\varepsilon_p^{'}$  от концентрации *m* дефектов замещения групп  $\ge$  Si–OH атомами V-ой группы (N, P, As) (*m* = 0 соответствует бездефектной структуре)

6) энергия верхней  $\varepsilon_p^{(3)}$  и нижней  $\varepsilon_p^{(4)}$  (рис. 5) границы II-*пр*-подзоны для всех концентраций дефекта возрастает в ряду N, P, As, что соответствует усилению прочности связей в ряду As–O, P–O, N–O, что и следовало ожидать, исходя из расположения химических элементов As, P, N в периодической системе (отметим, что длины вышеперечисленных связей (см. выше) убывают в той же последовательности). В зависимости от степени замещения  $m \varepsilon_p^{(4)}(As), \varepsilon_p^{(4)}(P),$  $\varepsilon_p^{(4)}(N)$  монотонно возрастают, а  $\varepsilon_p^{(3)}(As), \varepsilon_p^{(3)}(P),$  $\varepsilon_p^{(3)}(N)$  монотонно убывают с ростом *m*. В результате ширина  $\Delta \varepsilon_p^{(3;4)}$  II-*пр*-подзоны равномерно уменьшается с ростом *m*; при этом  $\Delta \varepsilon_p^{(3;4)}(\text{Si-OH}) > \Delta \varepsilon_p^{(3;4)}(\text{N}) > \Delta \varepsilon_p^{(3;4)}(\text{As}) > > \Delta \varepsilon_p^{(3;4)}(\text{P});$ 

7) введение дефектов в ДГС-структуру приводит не только к изменению границ и ширин энергетических зон, но и к появлению дополнительных узких зон, состояния электронов в которых обусловлено орбиталями атомов дефекта. Так, между верхней границей III-*пр*-зоны и нижней границей зоны (IV) вакантных состояний появляются состояния, как донорного типа (с энергиями  $\varepsilon'_p < \mu$ ), так и акцепторного типа (с энергиями  $\varepsilon'_p > \mu$ ), первые из которых обусловлены неподеленными парами D<sup>V</sup>-атомов, а вторые – разрыхляющими орбиталями связей D<sup>V</sup>–О. В соответствии с рис. 5,  $\varepsilon_p(P) > \varepsilon_p(N)$ (отличаются  $\approx$  на 0,1÷0,2 эВ) при любых  $m(\varepsilon_p(As))$  сливается с «верхушкой» Ш-*пр*-зоны), а при фиксированном дефекте  $\varepsilon_p$  монотонно убывает с ростом m ( $\approx$  на 0,2 эВ для N и  $\approx$  на 0,1 эВ для P). Что касается величин  $\varepsilon_c$ , то для них  $\varepsilon_c(N) < \varepsilon_c(As) < \varepsilon_c(P)$  и с ростом т  $\varepsilon_c(N)$ почти не изменяется, а  $\varepsilon_c(P)$  и  $\varepsilon_c(As)$  монотонно возрастает от  $\approx$  0,0 эВ (P; m = 1) и от  $\approx$  –0,4 эВ (As; m = 1) до  $\approx$  0,15 эВ (As; P; m = 6).

В области вакантных состояний между II-npи Ш-пр-подзонами и между І-пѕ- и П-пр-подзонами также возникают состояния, обусловленные дефектами, с энергиями  $\varepsilon_{p}^{"}$ ,  $\varepsilon_{p}^{"}$  и  $\varepsilon_{sp}$ (рис. 5). Состояния: а) с энергиями є (ниже «дна» Ш-пр-подзоны) обусловлены «глубокими» подуровнями неподеленных электронных пар D<sup>V</sup>-атомов; б) с энергиями  $\varepsilon_p^{"}$  (над верхней границей II-пр-подзоны) обусловлены «глубокими» связывающими орбиталями D<sup>v</sup>-O связей; в) с энергиями є , (под нижней границей ІІ-пр-подзоны) обусловлены еще более «глубокими» связывающими орбиталями D<sup>V</sup>-O связей. Появление  $\varepsilon_p^{"}$ -состояний характерны только для As- и P-замещения, а є "-состояния типичны только для N-замещения. Причем величины  $\varepsilon_{p}^{"}$ ,  $\varepsilon_{p}^{"}$ ,  $\varepsilon_{sp}$  от концентрации *m* почти не зависят и при этом  $\varepsilon_p^{"}(As) \simeq \varepsilon_p^{"}(P)$  и  $\varepsilon_{sp}^{'}(As) \simeq$  $\simeq \epsilon'_{sn}(P) \gg \epsilon'_{sn}(N) (\simeq \text{Ha } 2,2 \text{ } B).$ 

Анализ природы оптических спектров поглощения (рис. 3) (рассмотрены только переходы с энергиями фотонов менее 17 эВ) позволил установить следующее.

1) в случае бездефектной структуры проявляются (нумерация полос поглощения согласно рис. 4) одна полоса поглощения типа «1» (III $np \rightarrow$  IV) и две полосы поглощения типа «2» (II $np \rightarrow$  IV); соответствующие энергиям поглощенных фотонов  $\hbar\omega \approx 9,1$  эв («1»), 13,4 эВ («2а») и 15,9 эВ («2б»). Полоса «2а» имеет большую интенсивность по сравнению с полосой «2б»;

2) в  $D^{V}$ -замещенных структурах энергии переходов «1» и «2», характерные для дефектной структуры, изменяются следующим образом:

а) ћω («1»; P, As) остаются в пределах  $\approx 9,0\div9,2$  эВ, а ћω(«1»; N) с ростом концентрации дефекта *m* возрастает от  $\approx 9,2$ эВ (*m* =1) до  $\approx 9,9$  эВ (*m* =6); б) ћω («2а»; As) изменяется в пределах от  $\approx 13,4$  эВ (*m* =1) до  $\approx 14,0$  эВ (*m* =6), а ћω («2а»; N, P) изменяется в пределах от  $\approx 12,7$  эВ до  $\approx 14,1\div14,4$  эВ (*m* =6); в) ћω («26»; As) линейно убывает от  $\approx 15,9$  эВ (*m*=1) до  $\approx 15,6$  эВ (*m* =6); ћω («26»; P)  $\approx 15,8$  эВ и от концентрации дефекта почти не зависит; ћω («26»; N) минимальна при *m* =3 (ћω  $\approx 15,4$  эВ), а при *m* =1 и *m* = 6 ћω  $\approx 15,85$  эВ;

3) в D<sup>V</sup>-замещенных структурах возможны также переходы с участием состояний из подзон, обусловленных орбиталями дефектов. Эти переходы можно подразделить на три группы:  $\alpha$ ) из широких валентных пр-зон в узкие «примесные» вакантные подзоны (типа «3» и «4»);  $\beta$ ) из заполненных узких примесных подзон в зону вакантных состояний (IV) (типа «5», «6» и «7»),  $\gamma$ ) из узких занятых примесных подзон в узкие вакантные примесные подзоны (типа «8», «9» и «10»).

Для  $\alpha$ -переходов энергии поглощаемых фотонов лежат в диапазоне: 1) для («3»; N) от ћ $\omega \simeq 3,95 \div 4,9$  эВ до ћ $\omega \simeq 9,1 \div 9,9$  эВ; для («3»; P) от ћ $\omega \simeq 5,9 \div 6,15$  эВ до ћ $\omega \simeq 9,7 \div 10,3$  эВ; для («3»; As) от ћ $\omega \simeq 5,0 \div 5,3$  эВ до ћ $\omega \simeq 9,6 \div 10,4$  зВ; 2) для («4»; N) от ћ $\omega \simeq 9,6 \div 10,5$  зВ до ћ $\omega \simeq 15,6 \div 16,4$  зВ; для («4»; P) от ћ $\omega \simeq 11,4 \div 11,5$  зВ до ћ $\omega \simeq 16,0 \div 16,3$  зВ; для («4»; As) от ћ $\omega \simeq 10,2 \div 10,6$  зВ до ћ $\omega \simeq 15,7 \div 16,3$  зВ.

Для  $\beta$ -переходов нижняя граница величин  $\hbar \omega$  зависит от концентрации дефекта и находится в пределах: a) для («5»; N) от  $\approx$  6,0 эВ до  $\approx$  7,0 эВ; для («5»; P) от  $\approx$  6,0 эВ до  $\approx$  6,4 эВ; б) для («6»; P; As) от  $\approx$  10,15 эВ (m =1) до  $\approx$  10,5 эВ (m =6); в) для переходов типа «7» (характерно в основном для N-замещенных структур) – от  $\approx$  11,4 эВ до  $\approx$  12,2 эВ.

Для у-переходов можно указать как нижнюю, так и верхнюю границы величин ћо: а) ћо («8») отвечают энергиям нижней границы от  $\approx 3,5$  эВ (m =6) до  $\approx 4,4$  эВ (m =3) и от  $\approx 5,2$  эВ (m =6) до  $\approx 5,5$  эВ (m =1) для N- и P-замещенных структур соответственно и энергиям верхней границы от  $\approx 5,6$  эВ (m =1) до  $\approx 6,6$  эВ (m =6) и от  $\approx 6,2$  эВ (m =1) до  $\approx 6,9$  эВ (m =6) для N- и P-замещений соответственно. Положение максимумов поглощения для перехода типа «8» для N-замещенных структур с ростом концентрации дефекта возрастает от ћо  $\approx$  $\approx 5,3$  эВ (m =1) до  $\approx 5,9$  эВ (m =6), а для P-замещенных структур почти не изменяется и находится при ћ $\omega \approx 5,8$  эВ. б) ћ $\omega$  («9») отвечают энергиям нижней границы от  $\approx 9,2$  эВ (m =6) до  $\approx 9,65$  эВ (m =1) и от  $\approx 8,3$  эВ (m =6) до  $\approx 8,9$  эВ (m =1) для Р- и Аз-замещенных структур соответственно и энергиям верхней границы от  $\approx 10,4$  эВ (m =1) до  $\approx 11,1$  эВ (m =6) и от  $\approx 10,2$  эВ (m =1) до  $\approx 11,3$  эВ (m =6) для Ри Аз-замещений соответственно; в) ћ $\omega$  («10») (характерно в основном для N-замещенных структур) отвечают энергиям нижней границы от  $\approx 8,7$  эВ (m=6) до  $\approx 9,6$  эВ (m=3) и энергиям верхней границы от  $\approx 10,9$  эВ (m=1) до  $\approx 11,9$  эВ (m=6).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Герасименко, Н. Кремний – материал наноэлектроники / Н. Герасименко, Ю. Пархоменко. – М. : Техносфера, 2007. – 352 с.

2. Жигальский, А. А. Проектирование и конструирование микросхем : учеб. пособие / А. А. Жигальский. – Томск : ТУСУР, 2007. – 195 с.

3. Коротковолновая фотолюминесценция слоев SiO<sub>2</sub>, имплантированных большими дозами ионов Si+, Ge+ и Аг+ / Г. А. Качурин [и др.] // ФТП. – 1998. – Т. 32, № 4. – С. 439–444.

4. *Moreno, J.* Optimal meshes for integrals in real- and reciprocal-space unit cells / J. Moreno, J. M. Soler // Phys. Rev. B. – 1992. – Vol. 45. – P. 13891.

5. The Siesta method for ab initio order-N materials simulations / J.M. Soler [et al.] // J. Phys.: Condens. Matter. – 2002. – Vol. 14, N 11. – P. 2745–2779.

6. The SIESTA method; developments and applicability / E. Artacho [et al.] // J. Phys.: Cond. Matter. – 2008. – Vol. 20. – P. 1–6.

7. *Perdew, J. P.* Generalized gradient approximation made simple / J. P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof // Phys. Rev. Lett. – 1996. – Vol. 77. – P. 3865.

8. Troullier, N. Efficient pseudopotentials for plane-wave calculations / N. Troullier, J. L. Martins // Phys. Rev. B. - 1991. – Vol. 43, N 3. – P. 1993.

9. *Kleinman, L.* Efficacious Form for Model Pseudopotentials / L. Kleinman, D. M. Bylander // Phys. Rev. Lett. – 1982. – Vol. 48, N 20. – P. 1425–1428.

10. Молекулярные постоянные неорганических соединений / К. С. Краснов [и др.]. – Л. : Химия, 1979. – 448 с.

11. Xu, Y. Electronic and optical properties of all polymorphic forms of silicon dioxide / Y. Xu, W. Y. Ching // Phys. Rev. B - 1991 - Vol. 44. N 20 - P. 11048-11059

 Phys. Rev. B. – 1991. – Vol. 44, N 20. – Р. 11048–11059.
 12. Некрашевич, С. С. Электронная структура оксида кремния (обзор) / С. С. Некрашевич, В. А. Гриценко // ФТТ. – 2014. – Т. 56, вып. 2. – С. 209–223.

13. Литинский, А. О. Электронные ловушки в одномерных диэлектрических структурах с дефектами замещения электроноакцепторными группами / А. О. Литинский, Т. Ш. Нгуен // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6(79) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь» ; вып. 5). – С. 20–25.

 Литинский, А. О. Энергетический спектр электронов в широкощелевых одномерных структурах с регулярными дефектами / А. О. Литинский, Нгуен Т. Ш. // Наукоемкие технологии. – 2013. – Т. 14, № 4. – С. 19–25.
 15. Perdew, J. P. Self-interaction correction to density-func-

 Perdew, J. P. Self-interaction correction to density-functional approximations for many-electron systems / J. P. Perdew,
 A. Zunger // Phys. Rew. B. – 1981. – V. 23. – P. 5048–5079.
 16. Ilaria Ciofini. Self-interaction error in density func-

16. *Ilaria Ciofini*. Self-interaction error in density functional theory: a mean-field correction for molecules and large systems/ Ilaria Ciofini, Carlo Adamo, Henry Chermette // Chemical Physics. – 2005. – V. 309. – P. 67–76.

УДК 539:537.226.4

П. А. Бакулин, Л. В. Жога, В. В. Коренева, В. Н. Нестеров P. A. Bakulin, L. V. Joga, V. V. Koreneva, V. N. Nesterov

# ТОК УТЕЧКИ В СЕГНЕТОКЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЕ ПРИ ПОСТОЯННОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ LEAKAGE CURRENT IN FERROELECTRIC PLATES AT CONSTANT VOLTAGE ELECTRIC FIELD

# Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: todestriebe@yandex.ru, levjog@mail.ru, faithter@mail.ru

Приведены результаты измерения токов утечки в зависимости от времени в сегнетокерамике при условии наложения постоянного электрического поля. Определены изменения вида зависимости тока утечки от времени если размер одного из электродов образца изменяется. Обнаруженные изменения тока утечки объясняются изменением поляризации образца из-за создаваемой неоднородности электрического поля и изменением объемного заряда. Результаты подтверждают правильность использованного подхода.

Ключевые слова: моделирование, ток поляризации, доменные стенки, механическая нагрузка.

The results of measurement of leakage current versus time in a ferroelectric overlay provided a constant electric field. The changes in the form of the leakage current on the time dependence if the size of one of the electrodes of the sample changes are determined. The observed changes are explained by the leakage current due to the change in the polarization of the sample loading of the electric field generated by a change in the space charge. The results confirm the possibility of the used approach.

*Keywords*: modeling, polarization current, domain walls, mechanical stress.

## Введение

Ток утечки в сегнетокерамике при постоянной разности потенциалов определенной величины состоит из поляризационной и омической составляющих [1]. Поляризационная составляющая может быть обусловлена особенностью динамики изменения поляризации [2]. Поляризационную составляющую тока утечки можно менять путем изменения однородности электрического поля в заполяризованной пластине сегнетокерамики, изменяя размер одного из электродов.

# 1. Методика эксперимента и образцы

Для измерения тока в зависимости от времени в образце сегнетокерамики использовалась модернизированная схема Мерца [3]. Измерения проводились на поляризованных дисках сегнетокерамики на основе титаната и цирконата свинца (добротность Q = 260, коэффициент электромеханической связи k = 0,45, tg $\delta = 0,56$  (%), частота резонанса  $f_p = 121,1$  кГц, антирезонансная частота  $f_a =$ = 136,1 кГц). Исходные вожженные серебряные электроды диаметром 20 мм, толщина диска h=1 мм, изготавливались на заводе. Диаметр одного из электродов изменялся травлением. Испытания проводились на 10 образцах в каждом режиме.

Характеристики испытуемых образцов экспериментальные (емкость С и  $\tau_{p}^{3}$ ) и рассчитанные ( $\tau_{1}, \tau_{2}, \alpha_{1}, \alpha_{2}$ ) (поле вдоль остаточной поляризации)

№ Емкость		Емкость Время		Положительные значения тока				Отрицательные значения	
образца	0D/0u	С, нФ	релаксации $\tau^{\mathfrak{d}}_{p}$ , с	$\tau_1, c$	$\tau_2, c$	$\alpha_1 * 10^{-6}, \Phi/M$	α2*10 <sup>-6</sup> , Ф/м	$\tau_1, c$	$\tau_2, c$
30	20/20	6,26	6,83	4,15	3,36	0,0464	0,02655	1,2	0,69
28	20/6	0,47	7,33	1,85	541	0,0074	0,885	1,64	1,16

# 2. Результаты опытов и их обсуждение

На рис. 1, *а* приведены значения токов утечки для образцов, полученные при следующих условиях: в момент времени t = 0 включено постоянное электрическое поле напряженностью E = 1,5 MB/м и наблюдается пик силы

тока утечки, со временем спадающий по экспоненциально подобному закону до момента выключения напряжения. После выключения напряжения наблюдается отрицательный пик тока, который спадает со временем в условиях, когда E = 0.



Рис. 1. Зависимости тока от времени при постоянной разности потенциалов между электродами (напряженность электрического поля вдоль остаточной поляризации) разного размера на сегнетокерамической пластине: *D/d. D* = 20 мм; *d* = 20 мм, 6 мм: *a* – экспериментальные зависимости; *б* – смоделированные зависимости

Результаты изменения тока обсуждаются в рамках модели возникновения тока поляризации в сегнетоэлектриках [4–6]. Релаксационные процессы проявляют себя в постоянных электрических полях в виде спадания тока со временем, которое в первом приближении экспоненциально. Каждая поляризация развивающаяся в диэлектрике, характеризуется временем релаксации, например, в нашем случае  $\tau_p^3$ (или набором времен). С учетом этого ток поляризации сегнетокерамики можно описать системой уравнений:

$$\tau_1 p_1 + p_1 = \alpha_1 E;$$
 (1)

$$\tau_2 p_2 + p_2 = \alpha_2 E;$$
 (2)

$$j = p_1 + p_2,$$
 (3)

где  $p_1$  – поляризация, обусловленная быстрыми процессами, и  $p_2$  – поляризация, обусловленная более медленными процессами; коэффициенты  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  определяются геометрией взаимного расположения векторов напряженностей электрического поля E и направления векторов спонтанной поляризации  $\vec{P}_s$ ; j – плотность тока поляризации.

Проведено компьютерное моделирование зависимости тока поляризации от времени, согласно модели по уравнениям (1)–(3) и получены расчетные зависимости, качественно согласующиеся с экспериментальными зависимостями тока поляризации от времени (рис. 1,  $\delta$ ).

В таблице приведены значения коэффициентов уравнений (1)–(3), полученные при компьютерных расчетах вида зависимостей токов от времени.

Согласно модели, при включении постоянного электрического поля напряженностью Eвозникает ток смещения и при постоянной напряженности внешнего электрического поля начинается релаксация поляризации с характерным временем релаксации  $\tau_1$  под действием вынуждающей электрической силы, определяемой членом  $\alpha_1 E$  (1) и согласно уравнению (2) с характерным временем релаксации  $\tau_2$  под действием вынуждающей электрической силы, определяемой членом  $\alpha_2 E$ . В результате, поляризация образца уменьшается, а скорость ее изменения во времени обуславливает вид зависимости тока от времени, которая подчиняется экспоненциальному закону.

При отключении внешнего поля (рис. 1) разность потенциалов становится равной нулю. Скачок внешнего электрического поля (уменьшение до нуля) приводит согласно уравнениям (1)–(3) к возникновению импульса электрического поля, но распад его происходит уже в условиях отсутствия внешнего электрического поля, т. е. E = 0. В этом случае можно наблюдать деполяризационные процессы в образце, и компьютерный расчет дает возможность получить значения коэффициентов уравнений (1)–(3), связанных только с деполяризацией (см. таблицу).

С другой стороны, ток в сегнетоэлектрических образцах существенно определяется процессами образования объемных зарядов Q(t)в приэлектродной области образца.

По мере возрастания объемных зарядов Q(t) в приэлектродной области образца растет внутреннее электрическое поле

$$E_{Q}^{in} = \frac{Q(t)}{\varepsilon_0 \varepsilon S_{2\pi}},\tag{4}$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость образца;  $S_{3\pi}$  – площадь электродов.

Так как сегнетокерамика обладает спонтанной поляризацией, заполяризованные области создают дополнительное внутреннее электрическое поле

$$E_{p_{S}}^{in} = \frac{p_{S}}{\varepsilon_{0}\varepsilon}.$$
 (5)



Рис. 2. Зависимости тока от времени при постоянной разности потенциалов между электродами (напряженность электрического поля вдоль остаточной поляризации) разного размера на сегнетокерамической пластине: D/d. D = 20 мм; d = 20 мм, 6 мм

С учетом перечисленных внутренних полей релаксация объемных зарядов Q(t) в приэлек-

тродной области сегнетокерамического образца описывается уравнением

$$\tau \dot{Q} + Q = \varepsilon \varepsilon S_{\rm sm} \left( E^{ex} - E^{in} \right), \tag{6}$$

где  $\tau$  = время релаксации;  $\gamma$  – эффективная проводимость образца;  $E^{ex}$  – внешнее электрическое поле;  $E^{in} = E_Q^{in} + E_{p_s}^{in}$ 

В результате через образец протекает ток

$$i = i_0 e^{-\frac{i}{\tau}}; \tag{7}$$

$$i_0 = \gamma S_{\rm DH} \left( E^{\rm BX} - E^{in} \right). \tag{8}$$

Полученная зависимость тока от времени хорошо согласуется с полученными в эксперименте экспоненциальными зависимостями (рис. 2).

После травления электрода внешнее электрическое поле в области отсутствия электрода направлено под углом к исходному направлению спонтанной поляризацией  $P_{\rm S}$ . Так как энергетически выгодным является положение спонтанной поляризацией  $P_{\rm S}$ , направленной полю, то происходит постепенная перестройка доменной структуры сегнетокерамики путем необратимой релаксации доменных границ

i(t)/i<sub>0</sub>

0.8

0.6 0.4

0.2

0 0

2

$$\dot{\eta} x = 2P_{\rm s} E^{\rm BX}, \qquad (9)$$

где *x* – средняя скорость смещения доменных границ; η – эффективный коэффициент вязкости.

В области смещения доменных границ происходит поворот  $P_{\rm S}$ , при этом локальное значение внутреннего поля  $E_{p_{\rm S}}^{in}$  уменьшается; в результате часть объемного заряда освобождается. Величина освобождаемого заряда пропорциональна смещению доменных границ

$$Q_{p_s} = \beta x , \qquad (10)$$

где *x* – смещение доменных границ; β – коэффициент пропорциональности.

Это приводит к появлению дополнительного тока

$$i_{p_{S}} = \frac{2P_{S}\beta}{\eta}E^{\text{BX}}.$$
 (11)

В этом случае результирующий ток

$$i = i_0 e^{-\tau} + i_{p_s}.$$
 (12)

Полученная зависимость тока от времени качественно согласуется с полученной в эксперименте (рис. 1), но необходимо заметить, что дополнительный ток со временем уменьшается.



Рис. 3. Смоделированные зависимости силы тока от времени: *a* – с целыми электродами; *б* – с травленными электродами

10

#### 3. Заключение

4

б

t/τ

а

8

Полученные экспериментальные результаты зависимости тока утечки в сегнетокерамике при изменении размера электродов удается объяснить возникновением неоднородности электрического поля и, как следствие, возникновением изменения поляризации во времени. Предложенная модель позволит в дальнейшем провести количественные расчеты.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Подгорный, Ю. В. Токи утечки в тонких сегнетоэлектрических пленках / Ю. В. Подгорный, К. А. Воротилов, А. С. Сигов // ФТТ, – 2012. – Т. 54, В. 5. – С. 859–862.

2. Садыков, С. А. Процессы переключения поляризации в сегнетоэлектриках в самосогласованном электрическом поле : автореф. дис. ... д-ра физ-.мат. наук / С. А. Садыков; ДГУ. – Махачкала, 2001. – 38 с.

3. *Merz, W. J.* Domain Properties in BaTiO3 // Phys. Rev. – 1952. – № 88. – C. 421–425.

4. *Nesterov, V. N.* The computer analysis of dynamics of domain boundaries in ferroelectrics-Ferroelastics / V. N. Nesterov, A. V. Shil'nikov // Ferroelectrics. – 2002. – № 265. – C. 153–159.

5. *Shil'nikov, A. V.* Mechanisms of motion of domain and interphase boundaries and their computer simulation / Shil'nikov A. V., Nesterov V. N., Burkhanov A. I. // Ferroelectrics. – 1996. – № 175. – C. 145–151.

6. *Терех, В. В.* Исследование токов поляризации при одновременном действии электрического поля и механических напряжений в сегнетокерамике методом компьютерного моделирования движения доменных стенок / В. В. Терех, Л. В. Жога, В. В. Жога, В. Н. Нестеров, А. В. Габриэлян // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2012. – № 8(17). – С. 67–72. УДК 546.814-31: 538.915

# A. O. Литинский, C. C. Жуков, E. K. Михайленко A. O. Litinski, S. S. Zhukov, E. K. Mikhailenko

# ЭЛЕКТРОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ SnO<sub>2</sub> С ДЕФЕКТАМИ ЗАМЕЩЕНИЯ АТОМОВ ОЛОВА АТОМАМИ ИНДИЯ ELECTRONIC ENERGY AND MAGNETIC CHARACTERISTICS OF TIN DIOXIDE WITH SN-BY-IN SUBSTITUTION DEFECTS

# Волгоградский государственный технический университет Volgograd State Technical University

E-mail: litinski@inbox.ru, zs1978@mail.ru, em-10@mail.ru

Расчетная схема, основанная на теории функционала плотности с обменно-корреляционным потенциалом в градиентном приближении в валентном базисе двухэкспоненциальных гауссовых орбиталей была применена для расчета спектра одноэлектронных состояний и магнитных характеристик рутилового тетрагонального оксида олова (IV) как без дефектов, так и с замещениями атомов Sn на атомы In. Установлено, что при замене в ячейке Sn<sub>16</sub>O<sub>32</sub> одного или двух атомов Sn на атомы In устойчивыми оказываются высокоспиновые состояния, а при замене трех атомов – низкоспиновые состояния.

*Ключевые слова*: рутил, теория функционала плотности, магнитные свойства, дефекты замещения, спектр одноэлектронных состояний, дисперсионная кривая.

The computational model, based on density functional theory with the exchange-correlation potential in gradient approximation with valence double-zeta polarized basis set of Gaussian orbital was used to calculate the spectrum of electron states and magnetic characteristics of rutile-form tetragonal tin dioxide without defects and with a substitutions of Sn by In. It was revealed that high-spin states are most stable for one and two substitutions, low-spin states are most stable for three substitutions in the cell of  $Sn_{16}O_{32}$ .

Keywords: rutile, density functional theory, magnetic properties, substitution defects, electron spectrum.

#### Введение

Кристаллический диоксид олова (структура типа рутила) – полупроводник n-типа с шириной запрещенной зоны ~ 3,6 эВ [1]. Допирование различными атомами позволяет варьировать электрофизические характеристики SnO<sub>2</sub> в широком диапазоне, в частности, можно получать структуры как с диэлектрическими, так и с полупроводниковыми характеристиками [2, 3]. Поэтому оксид олова востребован в качестве материала для оптически прозрачных электродов в оптоэлектронных приборах (например, в мониторах, телевизорах и элементах солнечных батарей), а также в производстве газовых детекторов [4, 5]. Важнейшие свойства SnO<sub>2</sub> связаны с наличием дефектов в структуре [6].

# Методика расчета

Кристаллическая структура SnO<sub>2</sub> [7] моделировалась равномерно расширенной (вдоль основных векторов трансляции) элементарной ячейкой Sn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> с использованием циклических граничных условий. Расширенная ячейка состояла из (2x2x2)=8 элементарных ячеек (рис. 1). Параметры элементарной ячейки: a=b=4,74Å; c=3,19Å.

Атомы Sn в расширенной ячейке замещались атомами In. Произведенные замены соответст-

вуют формуле  $(SnInO_4)_m(Sn_2O_4)_{8-m}$ , где *m* пробегает значения 0, 1, 2 и 3. В настоящей работе при расчете использовались расширенные ячейки с неэквивалентными (из соображений симметрии) вариантами расположения атомов замещения. Для *m*=2 и *m*=3 было выбрано пять вариантов, а для m=1 – один вариант. В случае m=1атом Sn  $M_1$  (рис. 2) замещался атомом In, для m=2 замещались следующие пары атомов:  $M_1$ ,  $M_2$ ;  $M_1$ ,  $M_3$ ;  $M_1$ ,  $N_1$ ;  $M_1$ ,  $N_2$ ;  $M_1$ ,  $N_4$ , при m=3  $M_1$ ,  $M_2, M_3; M_1, M_2, N_1; M_1, M_2, N_3; M_1, M_3, N_2; M_1, M_4,$  $N_1$ . При расчете учитывалось возможное значение суммарного спина, приходящегося на расширенную ячейку, для *m*=1 суммарный спин одна вторая (дублет), для случая т=2 – единица и ноль (триплет и синглет), для случая m=3 одна вторая и три вторых (дублет и квартет). Таким образом, с учетом полного спина, были исследованы двадцать две различные структуры.

Для расчета использована вычислительная схема, основанная на теории функционала плотности (DFT) [8, 9], обобщенная на случай трехмерно-периодичных структур (программный пакет Siesta[10,11]). Использовался обменно-корреляционный потенциал градиентного типа в параметризации Пердью, Бурке и Эрнзерхофа [12] в базисе двухэкспоненциальных псевдоорбиталей с включением поляризационных функций (базис DZP). Влияние остовных электронов учитывалось введением эффективного остовного потенциала Труллье – Мартинсона – Клейнмана – Биландера [13]. Для интегрирования по пространственным переменным использовалась сетка, соответствующая разложению волновых функций электронов по плоским волнам с энергиями до 150 Ry.



Рис. 1. Структура SnO<sub>2</sub>: *a* – элементарная ячейка; *б* – равномерно расширенная вдоль векторов решетки a, b и с ячейка; *в* – зона Бриллюэна тетрагональной решетки

Проводилась оптимизация геометрии без дефектов и содержащей атомы замещения расширенной ячейки, путем поиска минимума полной энергии.

# Результаты и обсуждения

Особенностью строения кристаллов  $SnO_2$ является наличие атомных плоскостей симметрии (110) и ( $\overline{1}$  10), пересекающихся под прямым углом так как *a*=*b* (рис. 2), что определяет симметрию в распределении зарядов и магнитного момента на атомах структуры [7].

В результате расчета для бездефектного SnO<sub>2</sub> получены следующие постоянные решетки: 2a=2b=9,59Å, 2c=6,61Å (экспериментальные значения: 2a=2b=9,48Å, 2c=6,38Å[14]), углы между основными векторами прямые. Полученное отношение c/a равно 0,69 (экспериментальное значение c/a равно 0,67 [14]). Замещение атомов Sn на атомы In приводит к увеличению постоянных решетки и уменьшению угла  $\gamma$ : а) для m=1 2a=2b=9,65Å, 2c=6,67Å,  $\gamma=89,79^{\circ}$  (в [15] получены значения 2a=2b=9,87Å, 2c=6,57Å); б) для m=2 2a=2b=9,68Å, 2c=6,73Å,  $\gamma=89,54^{\circ}$ ; в) для m=3 2a=2b=9,76Å, 2c=6,81Å,  $\gamma=89,35^{\circ}$ .

На рис. 2 приведен фрагмент структуры, включающий в себя атом замещения и две сферы ближайших атомов соседей. Анализ изменения геометрии допированых ячеек позволил сделать вывод о высокой степени симметрии относительно атома In, изменения длин связей и углов в пределах первых двух сфер соседей.



Рис. 2. Схема расположения ближайших соседей к атому замещения. Слева направо – фрагмент структуры, атомы лежащие в плоскости (110) и в плоскости (110)

Габлица Г	1	Таблииа
-----------	---	---------

		ť			•			U I	,
т	$l_1$	φ <sub>2</sub>	$l_2$	$l_3$	$\phi_1$	φ <sub>3</sub>	$\phi_4$	$l_4$	φ5
0	2,11	128,4	2,11	2,11	103,3	76,7	103,3	2,08	128,4
1	2,05	122,1	2,36	2,05	105,8	74,2	99,2	2,32	125,0
2	2,06	122,4	2,37	2,06	106,6	73,5	100,0	2,35	124,5
3	2,06	122,6	2,37	2,06	106,6	73,4	100,1	2,35	124,5

Длины связей и углы в плоскости симметрии и вне ее (обозначения соответствуют рис. 3)

Полученные в результате длины связей Sn–O и In–O и углы приведены в табл. 1. Значение длины связи Sn–O  $l_2$ , полученное в настоящей работе, равно 2,11Å (экспериментальное значение равно  $\approx 2,05$  Å).

Повышение *m* приводит к увеличению  $l_2$ и уменьшению  $\varphi_3$ , что соответствует сближению атомов O(3)-O(4) и O(2)-O(5) и, одновременно, удалению их от атома In(1) вдоль плоскости (110). Стоит отметить, что, несмотря на уменьшение  $l_1$ ,  $l_3$  и  $\varphi_4$ , атомы Sn(6, 7, 8, 9, 10, 11) удаляются от атома-примеси In. Также с ростом концентрации In возрастает  $l_4$  и уменьшается угол  $\varphi_5$ , что приводит к отдалению атома Sn(14) от Sn(17) и Sn(15) от Sn(16).

В целом удаление друг от друга атомов Sn(8)-Sn(11), Sn(9)-Sn(10) в плоскости (110) и атомов Sn(14)-Sn(17), Sn(15)-Sn(16) в плоскости ( $\overline{1}$  10) происходит пропорционально, что приводит к равномерному увеличению постоянных *a* и *b*. Удаление друг от друга атомов Sn(7) и Sn(6) соответствует росту величины постоянной решетки *c*. При этом объем расширенной ячейки возрастает от 606,80Å<sup>3</sup> для бездефектной структуры до а) 621,82 Å<sup>3</sup> для *m*=1; б) 635,94 Å<sup>3</sup> для *m*=2; в) 649,26 Å<sup>3</sup> для *m*=3.

Расчет показал, что при увеличении концентрации примеси величина полной энергии, приходящейся на расширенную ячейку, понижается. Сравнение структур с эквивалентным расположением замещений позволяет сделать вывод, что в случае *m*=2 наиболее выгодными являются состояния с наибольшим спиновым моментом, а для *m*=3 с наименьшим.

В табл. 2 приведено распределение относительной плотности заряда (в единицах заряда электрона) на атомах ближайших соседей (рис. 3) (на эквивалентных атомах соседей величины зарядов одинаковы). Видно, что внесение примеси в структуру SnO<sub>2</sub> приводит к заметному перераспределению плотности между атомом примеси In(1) и атомами Sn(6) и Sn(7), принадлежащими одновременно плоскостям (110) и ( $\overline{110}$ ) (в среднем плотность увеличилась на  $\approx 0,12$ ). Зарядовая плотность на остальных атомах Sn и O изменяется несущественно.

Анализ спиновой составляющей зарядовой плотности показывает, что на всех атомах Sn плотность α-электронов совпадает с плотностью β-электронов с точностью до сотых, тогда как на ближайших к In атомах O(2,3,4,5) разница плотности а- и β-электронов существенна (табл. 3). Следовательно, на атомах кислорода имеется нескомпенсированный магнитный момент. Состояния с *m*=1 и 2 характеризуются наличием магнитного момента на атомах O(2,3,4,5) и O(12,13), тогда как в состоянии с m=3 магнитный момент на атомах О(12,13) в атомной плоскости (110) равен нулю. Это соответствует тому, что электронная плотность α-состояний смещается от атомов In к ближайшим атомам O(2,3,4,5), в меньшей степени к O(12,13), в то время как плотность β-электронов распределяется между атомом In и атомами Sn.

Поскольку кристаллические системы  $(SnInO_4)_m(Sn_2O_4)_{8-m}$  обладают отличным от нуля магнитным моментом (для m = 1 и 3 магнитный момент в пересчете на расширенную ячейку составляет один магнетон Бора  $\mu_B$ , а для m = 2 – два магнетона Бора), то энергетические характеристики целесообразно рассматривать раздельно для  $\alpha$ - и  $\beta$ -электронов.

Таблица 2

Распределение зарядовой плотности на атомах (две строки для *m*=3 соответствуют двум различным распределениям зарядовой плотности в пределах одной расширенной ячейки)

т	In(1)	O(12,13)	O(2,3,4,5)	Sn(8,9,10,11)	Sn(14,15,16,17)	Sn(6,7)
0	3,08	6,46	6,46	3,08	3,08	3,08
1	2,09	6,46	6,45	3,11	3,11	3,19
2	2,14	6,44	6,43	3,13	3,13	3,20
2	2,18	6,43	6,43	3,15	3,15	3,20
5	2,14	6,41	6,44	3,15	3,15	3,18

М	In(1)	O(12,13)	O(2,3,4,5)	Sn(8,9,10,11)	Sn(14,15,16,17)	Sn(6,7)
1	-0,02	0,03	0,09	-0,01	-0,01	-0,02
2	-0,03	0,05	0,12	-0,02	-0,02	-0,03
2	-0,01	0,00	0,07	-0,01	-0,01	-0,03
3	-0,01	0,00	0,04	-0,01	-0,01	-0,01

Распределение магнитного момента на атомах (две строки для *m*=3 соответствуют двум различным распределениям магнитного момента в пределах одной расширенной ячейки)

Спектр плотности состояний в ячейке SnO<sub>2</sub> состоит из валентной зоны и зоны проводимости, разделенных интервалом запрещенной зоны (см. рис. 3). Валентная зона разделяется на две подзоны  $\Delta \varepsilon_s$  и  $\Delta \varepsilon_p$ , основной вклад в которые вносят 2s- и 2p-состояния атомов кислорода. Энергетическая щель между верхней границей валентных состояний и нижней границей вакантных состояний составляет  $\approx 1,1$  эВ, что ниже экспериментального значения ( $\approx 3,6$  эВ). Отметим, что заниженные значения величины запрещенной зоны являются известным недостатком метода DFT.



Рис. 3. Схема спектра плотности состояний

Внесение атома-примеси In приводит к изменению границ подзон валентной зоны, границы зоны вакантных состояний и положения химического потенциала, что изображено на рис. 4.

Увеличение концентрации *m* приводит к смещению нижней границы s-подзоны  $\varepsilon'_{s}(\alpha)$  и  $\varepsilon'_{s}(\beta)$  (для  $\alpha$ -электронов и  $\beta$ -электронов) в сторону больших значений энергий, причем с увеличением *m*  $\varepsilon'_{s}(\beta)$  растет быстрее  $\varepsilon'_{s}(\alpha)$ . Максимальная величина смещения (относительно положения в бездефектной структуре) достигает  $\approx 0,4$  эВ, а начиная с *m* = 2 разница  $\varepsilon'_{s}(\alpha)$  и  $\varepsilon'_{s}(\beta)$  составляет 0,7 эВ. Верхняя граница s-подзоны  $\varepsilon'_{s}$  также смещается в сторону больших энергий, достигая значения  $\approx 0,35$  эВ.

В целом ширина s-подзоны для  $\alpha$ -состояний при внесении атома In (m = 1) увеличивается на 0,03 эВ, не изменяется при m = 2 и уменьшается на  $\approx 0,08$  эВ по сравнению с незамещенной структурой в случае m = 3. Величина  $\Delta \varepsilon_s \beta$ -электронов при m = 1 повышается сильнее, чем для  $\alpha$ -электронов (на  $\approx 0,11$  эВ), затем становится равным  $\Delta \varepsilon'_s(\alpha)$  для m = 2 и сохраняется для m = 3.

Нижняя граница р-подзоны  $\alpha$ -электронов  $(\epsilon_{p}^{'}(\alpha))$  испытывает незначительное смещение (0,06 3B) в сторону положительных энергий для  $m = 1, 2 \text{ и } 3, \text{ а смещение } \epsilon_{p}^{'}(\alpha)$  достигает максимального значения в  $\approx 0,15$  эВ для m = 1 и 2. При m = 3 значения  $\epsilon_{p}^{'}(\alpha)$  и  $\epsilon_{p}^{'}(\beta)$  совпадают, так как состояние с m = 3 является состоянием с наименьшим возможным спином. Верхняя

Таблица 3

граница р-подзоны  $\alpha$ -электронов  $\varepsilon_{p}(\alpha)$  с увеличением концентрации примеси сдвигается в сторону положительных энергий на  $\approx 0,15$  эВ, оставаясь неизменной для m = 2 и 3. Величина  $\varepsilon_{p}^{"}(\beta)$  для m = 2 уменьшается на  $\approx 0,07$  эВ, а для m = 3 увеличивается на  $\approx 0,06$  эВ, оставаясь неизменной при m = 1. В целом ширина р-подзоны для  $\alpha$ -электронов уменьшается при внесении примеси m = 1 и 2 (величина изменения составляет  $\approx 0,15$  эВ), оставаясь постоянной для m = 2 и 3. Ход кривой изменения  $\Delta \varepsilon_{\rm p}$  при m = 0и 1 для  $\alpha$ - и  $\beta$ -электронов совпадает, а затем увеличивается в случае m = 2 и 3 на  $\approx 0,13$  зВ по сравнению с незамещенной структурой.



Рис. 4. Зависимость положений границ подзон валентной зоны и уровня химического потенциала от концентрации примеси *m* 

Поскольку состояния с m = 3 являются низкоспиновыми, а m = 1 и 2 – высокоспиновыми, то можно ожидать, что химические потенциалы для  $\alpha$ - и  $\beta$ -электронов в первом случае будут различаться в меньшей степени, чем во втором. Видно, что при изменении mот 0 до 1  $\mu(\alpha)$  смещается в сторону положительных энергий на  $\approx 0,9$  эВ, а  $\mu(\beta)$  – в сторону отрицательных энергий на  $\approx 0,4$  эВ. При переходе к структурам с m = 2 изменение  $\mu$ незначительно, а для m=3 химические потенциалы для  $\alpha$ - и  $\beta$ -электронов становятся равны значению, отличающемуся от начального (при m = 0) на  $\approx 0,3$  эВ в сторону меньших энергий. Положения нижней границы зоны проводимости  $\varepsilon_c$  для  $\alpha$ - и  $\beta$ -электронов совпадают, повышение концентрации примеси mприводит к смещению в сторону более низких энергий на  $\approx 0,4$  эВ.

Дисперсионные кривые  $\varepsilon(\mathbf{k})$  и соответствующие им относительные плотности состояний  $\eta(\varepsilon)$  приведены на рис. 5.



Рис. 5. Дисперсионные кривые ε(*k*) и плотности состояний η(ε) для: *a* – бездефектного SnO<sub>2</sub>; *б* – *m*=1; *в* – *m* = 2; *г* – *m* = 3. Положение химического потенциала μ для α- и β-электронов отмечено пунктирной линией

Внесение акцепторной примеси In в расширенную ячейку SnO<sub>2</sub> приводит к появлению дополнительных состояний, обусловленных In, практически полностью находящихся в зоне вакантных состояний. Большая часть этих состояний находится вблизи єс, на расстоянии ≈ 1,0 эВ от границы. Атомы кислорода в допированной структуре создают дополнительные энергетические состояния вблизи верхней границы р-подзоны, а в s-подзоне происходит понижение с одновременным расширением пика. Атомы олова также вносят свой вклад в понижение и уширение пика в s-подзоне, а в p-подзоне изменение состояний атомов Sn незначительно. Рассмотренные выше изменения и обусловливают сдвиг s-подзоны в сторону положительных энергий.

Перераспределение электронной плотности и изменение профиля относительной плотности состояний  $\eta(\epsilon)$  приводит к тому, что  $\mu(\alpha)$  сдвигается в область вакантных состояний, а  $\mu(\beta)$  смещается к  $\epsilon_p^{"}$ . Таким образом, в системе появляется дырочная проводимость, обусловленная  $\alpha$ -зарядом.

При увеличении концентрации примеси до m = 2 и 3 также увеличивается плотность новых состояний вблизи верхних границ s- и p-подзон, а пик в s-подзоне понижается. Как целое, s-подзона смещается (см. рис. 4), а в отличие от случая m=1 пик в s-подзоне расщепляется на два пика, один из которых обусловлен новыми состояниями. Также «расщепление» происходит и в p-подзоне.

#### Заключение

В данной работе методом DFT с полной оптимизацией геометрии исследованы спектры одноэлектронных состояний тетрагонального  $SnO_2$  и структур, образованных замещением m = 1, 2 и 3 атомов Sn в расширенной ячейке 2x2x2 (образованной расширением элементарной ячейки вдоль каждого вектора трансляции) на атомы In. Установлено, что наиболее выгодными состояниями для таких структур являются состояния с отличным от нуля магнитным моментом, т. е. наиболее устойчивые структуры магнитно-активны.

Полученная равновесная структура бездефектного SnO<sub>2</sub> согласуется с экспериментальными данными и данными, полученными другими исследователями. При увеличении концентрации примеси структура незначительно искажается, основные векторы удлиняются на  $\approx 0.2$  Å, а угол между векторами **b** и **c** уменьшается от 90,0 до 89,3°. Длины связей увеличиваются также на  $\approx 0.2$  Å.

Повышение концентрации примеси приводит к а) смещению валентных подзон в сторону более высоких энергий; б) смещению нижней границы вакантных состояний в сторону более низких энергий; в) появлению новых состояний вблизи верхних границ s- и p-подзон валентной зоны.

Введение акцепторного атома In приводит к появлению спинового магнетизма. Магнитные моменты при этом локализованы преимущественно на атомах О, ближайших к атомам примеси In в атомной плоскости (110). Зарядовая плотность при этом распределяется между атомами примеси In и атомами Sn, принадлежащими обеим атомным плоскостям (110) и (110).

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры ЭВМ ВолгГТУ за предоставленный доступ к вычислительному кластеру.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Batzill, M.* The surface and materials science of tin dioxide / M.Batzill, U.Diebold // Progress in Surface Science, 2005. – V. 79. – P. 47–154.

2. *Toyosaki, H.* Electrical Properties of Ta-doped SnO2 thin films epitaxially grown on TiO2 substrate / H.Toyosaki, M.Kawasaki, Y.Tokura // Applied Physics Letters, 2008. – V. 93. – P. 132109-1–132109-3.

3. *Sentanin, F. C.* Optical and Electrochemical Properties of SnO2:Sb Thin Films Prepared by the Sol-Gel Process / F. C. Sentanin, A. Pawlicka, C. O. Avellaneda // Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2006. – V. 447. – P. 243–250.

4. Lee, W. An Ultraviolet Photodetector Based On TiO2/Water Solid-Liquid Heterojunction / Wen-Jen Lee, Min-Hsiung Hon // Applied Physics Letters, 2011. – V. 99. – P. 251102-1–251102-3.

5. *Wei, W.* Role Of Cu-doping in SnO2 Sensing Toward H2S / Wei Wei, Ying Dai, BaibiaoHaung // The Journal of Physical Chemistry C, 2011. – V. 115. – P. 18597–18602.

6. Sun, X. Structural, Electronic and Optical Properties of N-doped SnO2 / Xueqin Sun [идр.] // The Journal of Physical Chemistry C, 2008. – V. 112. – P. 9861–9864.

7. Wyckoff, R. W.G. Rutile Structure / R. W. G. Wyckoff / Crystal Structures, 1963. – V. 1. – P. 239–444.

8. *Koch W.*, Holthausen M.C. / A Chemist's Guide to Density Functional Theory. Weinheim: Wiley-VCH. – 2001. – 293 pp.

9. *Kohn, W.* Self-Consistent Équations Including Éxchange and Correlation Effects / Kohn W., Sham L.J. // Physical Review Letters, 1965. – V. 140. – № 4. – P. 1133–1138.

10. Soler, J. M. The SIESTA method for ab initio order-N materials simulation. / Soler J.M., Artacho E., Gale J.D., [et al.] // Journal of Physics Condensed Matter, 2002. – V. 14. – P. 2745–2779.

11. *Artacho, E.* The SIESTA method; developments and applicability / Artacho E., Anglada E., Dieguez O., Gale J.D., [et al.] // Journal of Physics: Condensed Matter, 2008. – V. 20. – P. 1–6.

12. *Perdew, J. P.* Generalized Gradient Approximation Made Simple / Perdew J.P., Burke K., Ernzerhof M. // Physical Review Letters, 1996. – V. 77. – № 18. – P. 3865–3868.

13. *Kleinman, L.* Efficacious Form for Model Pseudopotentials / Kleinman L., Bylander D. M. // Physical Review Letters, 1982. – V. 48. – № 20. – P. 1425–1428.

14. *Yamanaka, T.* X-ray diffraction study of bond character of rutile-type SiO2, GeO2 and SnO2 / Yamanaka T., Kurashima R., Mimaki J. // Z.Kristallogr., 2000. – V. 215. – P. 424–428.

15. Changpeng Chen, Electronic Structure and optical properties of La or In doped SnO<sub>2</sub>: First-principles calculations / Changpeng Chen, Meilan Qi // Advanced Materials Research, 2012. – V. 393. – P. 80–83.

УДК 537.226.4 (047.3)

#### С. В. Медников, А. Г. Подопригора, А. В. Харахордин S. V. Mednikov, A. G. Podoprigora, A. V. Kharakhordin

# КИНЕТИКА ФОСФОРЕСЦЕНЦИИ КРИСТАЛЛОВ ТРИГЛИЦИНСУЛЬФАТА С ФОТОАКТИВНЫМИ ПРИМЕСЯМИ KINETICS OF PHOSPHORESCENCE TRIGLYCINE SULPHATE CRYSTALS WITH PHOTOACTIVE DOPANTS

#### Волгоградский государственный технический университет Volgograd State Technical University E-mail: mednikov17@yahoo.com

Приведены результаты исследований кинетики затухания фосфоресценции монокристаллов триглицинсульфата, легированных фоточувствительными примесями органических люминофоров, после облучения импульсом света от ксеноновой лампы. Обнаружен обратимый эффект деградации фосфоресценции при многократных циклах облучения.

Ключевые слова: монокристаллический триглицинсульфат, фосфоресценция, органические люминофоры, кинетика затухания люминесценции.

The results of investigations of the kinetics of phosphorescence decay in triglycine sulphate single crystals doped with photosensitive organic phosphors after irradiation by the serial pulses of light from a xenon lamp are presented. A reversible effect degradation of phosphorescence as a result of serial cycles of irradiation is found.

Keywords: triglycine sulphate single crystals, phosphorescence, organic phosphors, the luminescence decay kinetics.

# Введение

Кристаллы триглицинсульфата (ТГС, химическая формула (NH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>COOH)<sub>3</sub> · H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) являются «модельными» объектами для изучения влияния примесей и внешних воздействий на физические свойства сегнетоэлектриков [1, 2]. Это обусловлено относительной легкостью выращивания из водных растворов совершенных кристаллов ТГС большого размера.

В связи с развитием оптических методов обработки информации, голографии, детектирования коротких оптических импульсов представляются полезными исследования влияния освещения излучением видимого диапазона на сегнетоэлектрические свойства кристаллов [3, 4]. ТГС является широкозонным диэлектриком, поэтому его монокристаллы прозрачны для видимого излучения [2]. Однако легирование кристаллов ТГС при выращивании молекулами окрашенных соединений позволяет получить объект, в котором можно ожидать воздействия оптического излучения на электрические, в том числе сегнетоэлектрические, характеристики.

Известно, что органические люминофоры и красители в твердых прозрачных матрицах (пластмассы, замороженные растворы, сахарные леденцы) демонстрируют существенно иной, более длительный во времени характер люминесценции, чем в жидких растворах [5].

В данной работе представлены результаты исследований кинетики затухания длительной фосфоресценции монокристаллов ТГС, легированных фоточувствительными молекулами Родамина 6Ж, Натриевого флуоресцеина и Антраниловой кислоты.

# 1. Образцы

Легированные фоточувствительными молекулами монокристаллы ТГС были выращены методом понижения температуры из двухкомпонентных растворов: водно-спиртовых – для введения примесей Родамина 6Ж и Натриевого флуоресцеина, водно-бензольных – для легирования кристалла молекулами Антраниловой кислоты. Выбор легирующих добавок был обусловлен тем, что Родамин 6Ж широко используется в лазерах на красителях [6], Натриевый флуоресцеин является известным люминесцентным индикатором [7], Антраниловая кислота – распространенное легирующее соединение при изготовлении сцинтилляционных детекторов [7]. Кроме того, молекулы органических люминофоров и красителей хорошо встраиваются в кристаллическую решетку триглицинсульфата [8]. Содержание примесных молекул в исходных растворах составляло 1 вес. %, содержание примесей в выращенных кристаллах специально не исследовалось.

Образцы для исследований выкалывались из выращенных кристаллов по плоскости спайности и доводились шлифовкой до размеров  $10 \times 10 \times 5 \text{ мм}^3$ . Плоскость наибольшей площади образцов совпадала с плоскостью совершенной спайности ТГС, которая нормальна к полярной оси *b* кристалла. Исключительно высокое качество поверхности, присущее сколам по плоскости спайности, обеспечивало малые потери света при облучении образцов.

#### 2. Методика проведения эксперимента

Образец помещался в камеру, внутренняя поверхность которой представляла собой зеркало в форме эллиптического цилиндра (для возбуждения генерации рубинового лазера ГОР – 100М). В одном из фокусов размещалась ксеноновая импульсная лампа ИНП-16/250А, в другом фокусе устанавливался образец. Энергия импульса составляла 4–5 кДж, величина освечивания в направлении, перпендикулярном оси лампы, не менее 16 ккд с (паспортные значения).

Интенсивность свечения образца регистрировалась с помощью фотоумножителя ФЭУ-38. Рабочее напряжение 1 кВ обеспечивалось высоковольтным источником ВС-22. Для предотвращения засветки ФЭУ импульсом вспышки применялся механический затвор, автоматически открывающий входной зрачок ФЭУ с задержкой 3 мс после включения вспышки.



Рис. 1. Форма импульса напряжения отклика ФЭУ

Исследуемый сигнал подавался на компьютерный осциллограф через резистивный делитель напряжения и выводился на экран компьютера при помощи программы Power Graph 2.1, которая является свободно распространяемой.

На рис. 1 приведена полученная нами в целях тарировки системы осциллограмма формы импульса электрического отклика ФЭУ. Длительность пропорционального ему оптического импульса лампы ИНП-16/250А, как видно из графика, не превосходит 3 мс (на уровне 0,35 от максимального значения).

Все измерения проводились при комнатной температуре. При проведении последовательных серий облучения образцов между облучениями предусматривались перерывы, для понижения температуры образца до комнатной. Замеры кинетики охлаждения образцов после воздействия оптического импульса, проведенные с помощью термопары, позволили установить, что выдержка 1 мин между воздействиями на образец достаточна для данных условий проведения экспериментов.

## 3. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены графики зависимостей кинетики люминесценции водных растворов Натриевого флуоресцеина (кривая *1*) и Родамина 6Ж (кривая *2*).



Рис. 2. Кривые затухания флуоресценции растворов органических люминофоров: 1 – Натриевый флуоресцеин; 2 – Родамин 6Ж

Рассчитанные по экспериментальным данным значения характеристического времени затухания составили: для раствора Натриевого флуоресцеина  $\tau = 19,2 \pm 3$  мс, для раствора Родамина 6Ж  $\tau = 19,8 \pm 2,5$  мс.

На рис. 3 приведены кривые затухания люминесценции исследованных образцов ТГС, легированных при выращивании молекулами Антраниловой кислоты (кривая 1), Натриевого флуоресцеина (кривая 2) и Родамина 6Ж (кривая 3).



Рис. 3. Кривые затухания фосфоресценции кристаллов ТГС с примесными молекулами: 1 – Антраниловой кислоты; 2 – Натриевого флуоресцеина; 3 – Родамина 6Ж

Из приведенных зависимостей видно, что затухание люминесценции молекул всех трех соединений, внедренных в кристаллическую решетку ТГС, может быть охарактеризовано как фосфоресценция с временами релаксации 0,06–0,3 с. Максимальной длительностью свечения, как показали наши результаты, обладает система ТГС+Антраниловая кислота.



Рис. 4. Уменьшение начальной интенсивности фосфоресценции кристаллов ТГС с примесными молекулами: 1 – Антраниловой кислоты; 2 – Натриевого флуоресцеина;





Рис. 5. Уменьшение времени релаксации фосфоресценции кристаллов ТГС с примесными молекулами: 1 – Антраниловой кислоты; 2 – Натриевого флуоресцеина; 3 – Родамина 6Ж

Проведение последовательных циклов облучения кристаллов с интервалом между воздействиями 1 мин выявило постепенное уменьшение интенсивности свечения и времени релаксации. Эти результаты приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

Оба этих явления обусловлены, по всей видимости, фотодеструкцией примесных молекул в интенсивном электромагнитном поле импульсной лампы, поскольку в условиях наших экспериментов фоточувствительные молекулы не выводились из зоны воздействия лампы, как это осуществляется в лазерах на красителях [6]. Как следует из зависимостей, показанных на рис. 4 и 5, наименьшей устойчивостью к фотодеструкции в кристаллической решетке ТГС обладают молекулы антраниловой кислоты.

Изменение фотофизических свойств исследованных систем носит обратимый характер. Образцы с Натриевым флуоресцеином и Антраниловой кислотой полностью восстанавливают исходные характеристики после выдержки в течение трех дней, образцы с Родамином 6Ж – за пять дней.

Причиной последовательного уменьшения времени релаксации во всех трех исследованных системах может являться образование в результате фотодеструкции каких-либо промежуточных окрашенных соединений, обладающих люминесцентными свойствами с меньшей интенсивностью (либо более высоким поглощением в решетке ТГС) и с другими характерными временами релаксации (наподобие F-центров в кристаллах ЩГК, подвергнутых рентгеновскому облучению [9]). F-центры в кристаллах КСl самопроизвольно исчезают за время порядка суток, при этом прозрачность и другие физические свойства кристалла восстанавливаются полностью.

#### 4. Выводы

В результате проведенных исследований определены характеристические времена затухания фосфоресценции в фотовозбужденных монокристаллах ТГС, легированных молекулами фоточувствительных соединений – Антраниловой кислоты, Натриевого флуоресцеина, Родамина 6Ж. Во всех исследованных системах наблюдается долговременная фосфоресценция, с характеристическими временами затухания 0,06–0,3 с, в отличие от растворов подобных соединений, где наблюдается короткоживущая флуоресценция, с временами, на порядок меньшими.

Во всех исследованных системах обнаружено постепенное уменьшение интенсивности фосфоресценции, а также уменьшение характеристического времени затухания, при проведении последовательных циклов освещения, с интервалами между воздействиями 1 мин, что связывается с фотодеструкцией примесных молекул вследствие облучения световым полем импульсной лампы. Сделан вывод о практически полном восстановлении поврежденных молекул в течение 3–5 суток.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иона,* Ф. Сегнетоэлектрические кристаллы / Ф. Иона, Д. Ширане. – М. : Мир, 1965. – 556 с.

2. Цедрик, М. С. Физические свойства кристаллов семейства ТГС (в зависимости от условий выращивания) / М. С. Цедрик. – Минск : Наука и техника, 1986. – 216 с.

3. *Фридкин, В. М.* Фотосегнетоэлектрики / В. М. Фридкин. – М. : Наука, гл. ред. физ.-мат. лит. 1979. – 264 с.

4. *Лайнс, М.* Сегнетоэлектрики и родственные им материалы / М. Лайнс, А. Гласс. – М. : Мир, 1981. – 736 с.

5. *Теренин, А. Н.* Фотоника молекул красителей и родственных органических соединений / А. Н. Теренин. – Л. : Наука, 1967. – 616 с.

6. Перестраиваемые лазеры на красителях и их применение / С. М. Копылов [и др.]. – М. : Радио и связь, 1991. – 240 с.

7. Степанов, Б. И. Введение в химию и технологию органических красителей / Б. И. Степанов. – М. : Химия, 1984. – 592 с.

8. *Медников, С. В.* Фотосегнетоэлектрические явления в примесном кристалле триглицинсульфата / С. В. Медников, А. Н. Дубинина, М. В. Етересков, А. И. Бурханов / Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – С. 61–66.

9. Ботаки, А. А. Радиационная физика ионных кристаллов / А. А. Ботаки, А. А. Воробьев, В. Л. Ульянов. – М.: Атомиздат, 1980. – 208 с.

# - ВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.64

#### А. В. Ермолаев, А. А. Ермолаева, И. В. Поляков А. V. Ermolaev, А. А. Ermolaeva, I. V. Polyakov

# КОМБИНАЦИОННЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ В СПЕКТРЕ ГЕНЕРАЦИИ МАГНЕТРОНА ПРИ МОДУЛЯЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА ПЕРЕМЕННЫМ АНОДНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ COMBINATIONAL COMPONENTS IN THE GENERATION SPECTRUM MAGNETRON MODULATION OF HIGH ANODE ALTERNATING ANODE VOLTAGE

Волгоградский государственный технический университет Volgograd State Technical University

E-mail: magnetton@rambler.ru, an9l@list.ru, liichkap@mail.ru

Исследования влияния переменного анодного напряжения на электронный поток, проведенные с использованием самосогласованной математической модели магнетронного генератора, показали, что соответствующим подбором частоты переменной составляющей анодного напряжения можно получить комбинационные гармонические составляющие в генерируемом спектре сигнала как в полосе пропускания, так и за ее пределами.

*Ключевые слова*: магнетрон, спектр генерации, комбинационные составляющие, математическая модель, колебания **π**-вида.

Research on the influence of alternating anode voltage on the electron flux conducted using a self-consistent mathematical model of the magnetron oscillator shown that an appropriate choice of the frequency of the variable component of the anode voltage, you can get the combination harmonic components in the spectrum of the signal generated in both the passband and beyond.

*Keywords*: magnetron generator, spectrum of a generated signal, combinational components, mathematical model,  $\pi$ -mode.

#### Введение

В настоящее время все больше внимания уделяется возможности генерации сигналов сложного спектрального состава и управлению спектром генерации. Такие проблемы возникают при конструировании приборов антирадарной защиты, в которых используются системы из нескольких магнетронов, работающих на разных частотах [1]. Антирадарная система создает на экранах РЛС сигнал с комбинационными составляющими, имитирующими ложные (фантомные) цели. Для расширения спектра сигнала используется сочетание нескольких магнетронов, что сильно увеличивает массу прибора в целом, так как магнетронные блоки генератора достаточно тяжелы. Наличие нескольких магнетронов связано с тем, что ширина полосы пропускания магнетрона достаточно мала и составляет несколько процентов от частоты несущей. Поэтому увеличение полосы пропускания очень сильно усложняет конструкцию и стоимость прибора.

При использовании классических магнетронов для генерации сигналов с комбинационными составляющими в спектре более продуктивной оказывается идея, аналогичная рассматриваемой в работе [2].

Суть подхода состоит в том, чтобы заставить электронный поток колебаться с нужной частотой, что приведет к появлению в спектре генерируемого высокочастотного сигнала дополнительных гармонических составляющих. Для модуляции электронного потока в этом случае можно использовать переменную составляющую анодного напряжения.

Конструктивная реализация такого подхода потребует лишь незначительной переделки источника питания. Изменения конструкций магнетрона в этом случае не требуется и возможно использование серийных моделей.

#### 1. Математическая модель

Теоретические исследования, позволяющие обосновать возможность генерации комбинационных составляющих в спектре магнетрона при модуляции электронного потока изменяющимся анодным напряжением и дать рекомендации по выбору режимов, начинаются с экспериментального моделирования процессов на математической модели магнетронного генератора. Для исследования таких процессов используется самосогласованная многочастотная трехмерная модель магнетронного генератора [3, 4] реализованная методом «крупных частиц». Система уравнений состоит из уравнений движения заряженных частиц в скрещенных полях:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_r}{\partial t} &= \left| \eta \right| E_r + \frac{v_{\varphi}^2}{r} - \omega v_{\varphi}; \quad \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial t} &= \left| \eta \right| E_{\varphi} - 2 \frac{v_r v_{\varphi}}{r} + \omega v_r; \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} &= \left| \eta \right| E_z, \end{aligned}$$

36
где r,  $\phi$ , z – координаты частиц в цилиндрической системе; v<sub>r</sub>, v<sub>o</sub>. v<sub>z</sub> – составляющие скорости частиц;  $E_r$ ,  $E_{\phi}$ ,  $E_z$  – компоненты вектора суммарной напряженности высокочастотного, кулоновского и статического полей; ш - частота циклотронных колебаний.

Напряженность электрического поля, входящая в правую часть уравнений движения, представляется в виде суперпозиции напряженностей высокочастотного поля Ē; постоянного поля приложенного между анодом и катодом Е<sub>0</sub>; поля пространственного заряда Е' и высокочастотного поля  $\tilde{\mathbf{E}}_{\mathbf{0}}$  модулирующего сигнала, поданного на анод магнетрона:

$$\mathbf{E} = \mathbf{\tilde{E}} + \mathbf{E}_0 + \mathbf{E'} + \mathbf{\tilde{E}}_0$$

Для нахождения распределения поля пространственного заряда, решается уравнение Пуассона, записанное в цилиндрической системе координат:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial U}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \rho(r, \varphi, z),$$

а затем, из соотношения

$$\mathbf{E}' = -gradU(\mathbf{r}, t)$$

 $\mathbf{E}' = -gradU(\mathbf{r}, t)$ вычисляется напряженность поля **E'** в точке нахождения частицы

Высокочастотное поле Е резонансной системы представляют в виде разложения по структурным функциям электродинамической структуры магнетрона с коэффициентами, зависящими от времени.

$$\tilde{\mathbf{E}} = \boldsymbol{\Sigma} A_{\mathbf{n}}(t) \boldsymbol{e}_{\mathbf{n}}(x, y, z).$$

Амплитудную часть находим, решая систему уравнений возбуждения:

$$\frac{dA_n}{dt} = -\frac{1}{N_n 2\pi} \int_{t-T_n V}^{t} \int_{V} \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} \mathbf{e}_n dV \cos(\omega_n \tau + \psi_n) d\tau - \frac{\omega_n}{2Q_n} A_n;$$
$$\frac{d\psi_n}{dt} = -\frac{1}{A_n N_n 2\pi} \int_{t-T_n V}^{t} \int_{V} \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} \mathbf{e}_n dV \sin(\omega_n \tau + \psi_n) d\tau,$$

где  $N_n$  – эквивалентная емкость замедляющей системы или норма; T<sub>n</sub> – период колебаний с номером n; **ј** – возбуждающий ток;  $e_n$  – структурная функция поля данного вида колебаний.

$$e_{r} = -\frac{N\theta}{\pi kr} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \gamma \left(\frac{\sin \gamma \theta}{\gamma \theta}\right) \frac{Z_{\gamma}(kr)}{Z_{\gamma}'(kr_{a})} \sin(\gamma \phi) \sin\left(\frac{\pi}{w}z\right),$$

$$e_{\varphi} = \frac{N\theta}{\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left( \frac{\sin \gamma \theta}{\gamma \theta} \right) \frac{Z_{\gamma}(kr)}{Z_{\gamma}'(kr_{a})} \cos(\gamma \varphi) \sin\left(\frac{\pi}{w}z\right);$$

здесь Z<sub>γ</sub> и Z'<sub>γ</sub> – комбинация функций Бесселя и Неймана:

$$Z_{\gamma}(kr) = J_{\gamma}(kr) - \frac{J_{\gamma}(kr_{k})}{N_{\gamma}(kr_{k})} N_{\gamma}(kr),$$
$$Z_{\gamma}'(kr) = J_{\gamma}'(kr) - \frac{J_{\gamma}'(kr_{k})}{N_{\gamma}'(kr_{k})} N_{\gamma}'(kr),$$

N – количество резонаторов в замедляющей системе;  $\gamma = n + mN$  – постоянная распространения; k – волновое число; θ – половинный размер щели резонатора.

Система дополняется уравнениями, описывающими термоэлектронную эмиссию, и уравнениями, описывающими вторичную эмиссию.

Входными параметрами модели взяты геометрия пространства взаимодействия и электродинамический режим широко распространенного классического магнетрона М-155.

#### 2. Результаты экспериментов

Электронный поток в магнетронном генераторе можно рассматривать как систему с квадратичной нелинейностью, на вход которой подан синусоидальный сигнал, генерируемый резонаторной системой магнетрона. В теории нелинейных колебаний показано [5], что на выходе такой системы спектр сигнала имеет дополнительно постоянную составляющую и вторую гармонику входного сигнала.

Спектр выходного сигнала при постоянном анодном напряжении изображен на рис. 1.

По оси абсцисс на графике отложена частота гармоники, выраженная в ГГц. По оси ординат откладываются амплитудные значения Фурье-гармоник мощности, выраженные в абсолютных единицах.

Эксперименты, проведенные на модели, показывают, что постоянная составляющая сигнала присутствует в спектре, но поскольку она не играет ни какой роли в исследуемых процессах, то отфильтровывается на этапе Фурье-анализа.

Мощность основной гармоники спектра с частотой 2,45 ГГц, соответствующей частоте генерации, составляет 1073 Вт. Характерной особенностью спектров генерации магнетрона M-155 является нарастание уровня мощности второй гармоники, частота которой близка к циклотронной частоте. В рассматриваемом спектре мощность, приходящаяся на вторую гармонику, составляет 507 Вт.



Рис. 1. Спектр сигнала при постоянном анодном напряжении

При подаче на вход системы с квадратичной нелинейностью двух сигналов с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  в спектре выходного сигнала появляются комбинационные гармоники с частотами  $\omega_1 \pm \omega_2$ . В работе [6] рассматривается случай, когда такие комбинационные составляющие возникают при воздействии на электронный поток двух сигналов разных видов колебаний – основного сигнала

 $\pi$ -вида и побочного сигнала  $\left(\frac{N}{2}+1\right)$ -вида. Одна-

ко в этом случае изменение частоты побочного вида колебаний требует перенастройки магнетрона, что ограничивает возможности получения комбинационных составляющих нужных частот.

Если же на электронный поток воздействуют сигнал  $\pi$ -вида и переменная составляющая анодного напряжения, частота колебаний которой сравнима с частотой колебаний основного сигнала, то частоты возникающих комбинационных составляющих подчиняются другой закономерности.

Для получения комбинационных составляющих в спектре генерации магнетрона электронный поток модулируется анодным напряжением, которое можно представить в виде суммы постоянной и переменной синусоидальной составляющих. Постоянная составляющая напряжения  $U_0$  определяется по номинальным параметрам магнетрона. Большинство рассмотренных в работе экспериментов проводилось при  $U_0 = 3900$  В. Выбор амплитуды переменной составляющей анодного напряжения

$$U_{\sim} = \frac{U_0}{k}$$

в зависимости от величины k определяет условия возникновения комбинационных гармоник в спектре и уровень их мощности.

При k > 15 модуляции потока не происходит при любых частотах переменной составляющей напряжения. При k < 5 происходит срыв режима генерации во всем интервале частот переменной составляющей. Таким образом, для рассматриваемого магнетрона возбуждение комбинационных составляющих возможно, если значение амплитуды  $U_{\sim}$  выбирается в интервале от 260 до 780 В.

На рис. 2 представлен спектр выходного сигнала при частоте колебаний  $\pi$ -вида  $f_{\pi}$ =2,45 ГГц и частоте переменной составляющей анодного напряжения  $f_a$ =0,5 ГГц. Возле первой гармоники (2,45 ГГц) появляются комбинационные составляющие, с частотами 2,69; 2,20 и 1,96 ГГц. Возле второй гармоники (4,9 ГГц) уровень шума превышают гармоники с частотами 5,14 и 4,65 ГГц. Кроме того, имеется низкочастотная составляющая 0,245 ГГц.



Рис. 2. Спектр сигнала с комбинационными составляющими при переменном анодном напряжении

Анализ спектра показывает, что частоты комбинационных гармоник подчиняются соотношению

$$f_{i,n} = f_n + \frac{f_a}{2}i, \qquad (1)$$

где  $f_n$  – частота *n*-й гармоники выходного сигнала (n = 1, 2);  $f_a$  – частота переменной составляющей анодного напряжения; i – номер комбинационной составляющей, при этом  $i = \pm 1$ ,  $\pm 2...$  Для низкочастотной составляющей справедлива другая формула:



то есть она является комбинационной составляющей нулевой гармоники.

Выберем частоту переменной составляющей анодного напряжения равной 0,2 ГГц, в этом случае формула (1) предсказывает появление комбинационных составляющих вблизи несущей 2,45 ГГц с частотами  $f_{1,-1} = 2,35$  ГГц и  $f_{1,1} =$ = 2,55 ГГц, попадающих в полосу пропускания магнетрона. Спектр выходного сигнала в этом случае изображен на рис. 3. В дополнение к предсказанным частотам в этом спектре появляются комбинационные составляющие второй гармоники  $f_{2,-1} = 4,8$  ГГц,  $f_{2,1} = 5,0$  ГГц, а так же низкочастотная составляющая  $f_0 = 0,1$  ГГц.



Рис. 3. Спектр сигнала с комбинационными составляющими в полосе пропускания магнетрона

Увеличение амплитуды  $U_{\sim}$  приводит к росту уровня мощности комбинационных составляющих. На рис. 4 показан спектр амплитуды переменной составляющей  $U_{\sim}=260$  В и частоты переменной составляющей анодного напряжения  $f_a=1,33$  ГГц. В спектре появляются комбинационные составляющие первой гармоники с частотами  $f_{1,-1} = 1,78$  ГГц и  $f_{1,1} = 3,12$  ГГц, уровни мощности которых, определяемые от-

носительно абсолютного значения мощности первой гармоники (920 Вт), составляют соответственно минус 11,5 дБ и минус 8,1 дБ. Уровень второй гармоники равен минус 3,4 дБ, а уровни ее гармонических составляющих  $f_{2,-1} = 4,8$  ГГц,  $f_{2,1} = 5,0$  ГГц соответственно минус 12,4 дБ и минус 14,3 дБ. Уровень мощности комбинационной составляющей нулевой гармоники  $f_0 = 0,1$  ГГц равен минус 8,1 дБ.



Частота колебаний  $\pi$ -вида  $f_{\pi}$ =2,45 ГГц. Частота переменной составляющей анодного напряжения  $f_a$ =1,33 ГГц. Амплитуда переменной составляющей  $U_{\sim}$ =260 В

Рис. 4. Спектр сигнала с комбинационными составляющими

При увеличении амплитуды переменной составляющей анодного напряжения до 390 В абсолютное значение мощности первой гармоники уменьшается до 820 Вт. Уровни гар-

моник  $f_{1,-1}$  и  $f_{1,1}$  возрастают до минус 9,9 дБ и минус 6,3 дБ; гармоник  $f_{2,-1}$  и  $f_{2,1}$  до минус 10,6 дБ и минус 12,9 дБ; гармоники  $f_0$  до минус 6,0 дБ (рис. 5).



Частота колебаний π-вида f<sub>π</sub>=2,45 ГГц. Частота переменной составляющей анодного напряжения f<sub>a</sub>=1,33 ГГц. Амплитуда переменной составляющей U<sub>~</sub>=390 В

Рис. 5. Спектр сигнала с комбинационными составляющими

При максимально возможном значении  $U_{\sim}=780$  В (рис. 6) абсолютная мощность первой гармоники составляет приблизительно 770 Вт. Комбинационные составляющие первой гармоники  $f_{1,-1}$  и  $f_{1,1}$  возрастают до минус 6,2 дБ и минус 3,2 дБ соответственно. В результате гармоника  $f_{1,1}$  по абсолютному значению «обгоняет» вторую гармонику, уровень которой в рассматриваемом режиме равен минус 3,5 дБ. Ком-

бинационные гармоники  $f_{2,-1}$  и,  $f_{2,1}$  растут значительно медленнее, их уровни минус 9,1 дБ и минус 9,9 дБ соответственно. Уровень комбинационной составляющей  $f_0$  возрастает до минус 2,6 дБ, при этом спектр в низкочастотной области начинает насыщается шумовыми гармониками, уровни которых превышают уровни комбинационных составляющих второй гармоники.



Частота колебаний π-вида f<sub>π</sub>=2,45 ГГц. Частота переменной составляющей анодного напряжения f<sub>a</sub>=1,33 ГГц. Амплитуда переменной составляющей U<sub>~</sub>=780 В

Рис. 6. Спектр сигнала с комбинационными составляющими

#### 3. Заключение

Таким образом, наличие высокочастотной составляющей анодного напряжения может приводить к модуляции электронного потока и возбуждению комбинационных гармоник, насыщающих спектр генерируемого сигнала. Частоты комбинационных гармоник связаны с частотой переменной составляющей напряжения, в результате чего возникает возможность управления спектральным составом сигнала.

Уровни мощности возникающих в этом случае комбинационных гармоник зависят от амплитуды переменной составляющей анодного напряжения. При максимально возможной амплитуде мощность некоторых гармоник может достигать половины мощности гармоники несущей частоты, что является несомненным преимуществом этого способа насыщения спектра генерации магнетрона.

Полученные результаты могут быть использованы при конструировании широкого круга приборов, используемых для антирадарной защиты.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бакулев, П. А. Радионавигационные системы / П. А. Бакулев, А. А. Сосновский. – М. : Радиотехника, 2011. – 272 с.

2. Поляков, И. В. Исследование процесса возбуждения комбинационных составляющих при низкочастотной модуляции электронного потока в скрещенных полях / И. В. Поляков, А. Г. Шеин // Вопросы физической метрологии. Вестник Поволжского отделения Метрологической Академии России. – 1999. – № 1. – С. 113–128.

3. *Ермолаев, А. В.* Численная модель многочастотного взаимодействия в магнетронном генераторе / А. В. Ермо-

лаев // Вопросы физической метрологии: Вестник Поволжского отделения Метрологической академии России. – 1999. – Вып. 1. – С. 94–102.

4. Ермолаев, А. В. Математическое моделирование процесса конкуренции видов колебаний при возбуждении комбинационных составляющих в спектре генерации магнетрона / А. В. Ермолаев, И. В. Поляков, О. А. Оленникова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8(111) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах ; вып. 16). – С. 10–14.

5. *Кузнецов, А. П.* Нелинейные колебания / А. П. Кузнецов, С. П. Кузнецов, Н. М. Рыскин. – М. : Физматлит, 2002. – 310 с.

6. Оленникова, О. А. Возбуждение комбинационных составляющих в спектре магнетронного генератора при конкуренции соседних видов колебаний / О. А. Оленникова, А. В. Ермолаев, И. В. Поляков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь»; вып. 7). – С. 45–50.

УДК 621.385.6

# Д. Л. Еськин D. L. Yeskin

# ПОДАВЛЕНИЕ КОМБИНАЦИОННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПРИ УСИЛЕНИИ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА В ЛБВ М-ТИПА The COMBINATIONAL FREQUENCIES SUPPRESSION by the MULTIGARMONIC SIGNAL AMPLIFICATION in a TWT M-TYPE

# Волгоградская академия МВД России Volgograd Academy of the Ministry of the Interior of Russia

E-mail: yd38@bk.ru

Приводятся результаты исследования процесса возбуждения волн комбинационных частот при усилении в ЛБВ М-типа сигнала сложного спектрального состава, представляющего собой суперпозицию монохроматических волн с близкими частотами, лежащими в одной полосе пропускания замедляющей системы. Показано, что подача на вход усилителя дополнительного сигнала малой мощности может приводить к подавлению комбинационных составляющих в спектре выходного сигнала.

*Ключевые слова*: лампа бегущей волны, М-тип, генерация, усиление, комбинационные частоты, многочастотный сигнал, спектр, искажение сигнала.

The research results of process of combinational frequencies waves' excitation by the complex spectral composition signal amplification in a TWT M-type, which are superposition of monochromatic waves with closely frequencies lying in the same bandwidth of slow-wave system, are presented in the article. Here is demonstrated that the delivering into the amplifier an additional small capacity input signal could lead to combinational components suppression in the output signal spectrum.

*Keywords*: traveling wave tube, M-type, generation, amplification, combinational frequencies, multiharmonic signal, spectrum, signal distortion.

# Введение

Приборы М-типа, представителем которых является лампа бегущей волны, уже давно заняли и удерживают лидирующие позиции среди электровакуумных СВЧ-приборов в таких областях, как радиолокация и радионавигация. Это, прежде всего, связано с их высокой надежностью и длительным сроком службы. С другой стороны, ряд их недостатков, к которым в первую очередь следует отнести искажение усиливаемого сигнала, осложняют возможности их практического применения. Одним из вариантов искажения спектра выходного сигнала при усилении полигармонической волны является возбуждение сигналов комбинационных частот.

Вопросам усиления и генерации полигармонических сигналов в приборах М-типа посвящен целый ряд работ [1–5]. В работе [6] изучаются спектры выходного сигнала в случае усиления сигнала, представляющего собой суперпозицию нескольких монохроматических волн близких частот с одинаковым уровнем входной мощности применительно к ЛБВ.

В данной же работе исследуется влияние величины уровня входной мощности одной из гармоник усиливаемого сигнала на отношение уровней выходной мощности на комбинационных частотах.

#### Математическая модель лампы бегущей волны

С целью исследования процессов, протекающих в приборе, используется специально созданная двумерная модель. К основным уравнениям модели относятся:

 – система уравнений движения, записанных для каждой «крупной» частицы

$$\frac{d\mathbf{v}_{i}}{dt} = \eta \left( \mathbf{E} + \left[ \mathbf{v}_{i}; \mathbf{B}_{0} \right] \right) \\
\frac{d\mathbf{r}_{i}}{dt} = \mathbf{v}_{i}$$
(1)

где  $\eta$  – приведенный заряд частицы; **E** – электрическое поле, действующее *i*-ю частицу и представляющее собой суперпозицию электростатического поля **E**<sub>0</sub>, поля пространственного заряда **E**<sub>SC</sub>, создаваемого другими частицами, а также собственных полей замедляющей системы и полей, обусловленных излучением заряженных частиц **E**<sub>SHF</sub>; **B** – статическое магнитное поле;

уравнения возбуждения

$$\operatorname{Re}\left(\frac{1}{\operatorname{v}_{gr}}\frac{\partial A_{s}^{n}}{\partial t}+\frac{\partial A_{s}^{n}}{\partial z}\right)=\frac{Ke\omega_{0}B_{s}^{n}\exp\left(\alpha_{s}^{n}z\right)}{4P_{s}^{n}\pi}\frac{\Delta t}{\Delta z}\times\times\sum_{T_{0}}\sum_{\Delta V}\left(v_{i,z}sh(\gamma_{s}^{n}y)\cos\left(n\omega t_{j}-\beta_{s}^{n}z\right)-v_{i,y}\frac{\beta_{s}^{n}}{\gamma_{s}^{n}}ch(\gamma_{s}^{n}y)\sin\left(n\omega t_{j}-\beta_{s}^{n}z\right)\right),\tag{2}$$
$$\operatorname{Im}\left(\frac{1}{\operatorname{v}_{gr}}\frac{\partial A_{s}^{n}}{\partial t}+\frac{\partial A_{s}^{n}}{\partial z}\right)=-\frac{Ke\omega_{0}B_{s}^{n}\exp\left(\alpha_{s}^{n}z\right)}{4P_{s}^{n}\pi}\frac{\Delta t}{\Delta z}\times\times\sum_{T_{0}}\sum_{\Delta V}\left(v_{i,y}\frac{\beta_{s}^{n}}{\gamma_{s}^{n}}ch(\gamma_{s}^{n}y)\cos\left(n\omega t_{j}-\beta_{s}^{n}z\right)+v_{i,z}sh(\gamma_{s}^{n}y)\sin\left(n\omega t_{j}-\beta_{s}^{n}z\right)\right),$$

где  $B_s^n$  – вещественная амплитуда волны, распространяющейся в замедляющей системе при отсутствии электронного потока;  $P_s^n$  – мощность структурной функции;  $\beta_s^n$  и  $\gamma_s^n$  – продольная и поперечная постоянные распространения;  $\omega$  – фундаментальная частота; n – номер временной гармоники;  $\alpha_s^n$  – коэффициент затухания для данной волны; K – коэффициент укрупнения;

 соотношения для нахождения собственных полей замедляющей системы и полей, обусловленных излучением заряженных частиц

$$E_{\text{SHF},y} = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ -\frac{\beta_s^n}{\gamma_s^n} B_s^n ch(\gamma_s^n y) \left[ \operatorname{Im} C_s^n \cos\left(n\omega t - \beta_s^n z\right) + \operatorname{Re} C_s^n \sin\left(n\omega t - \beta_s^n z\right) \right] \right\} \\ E_{\text{SHF},z} = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ B_s^n sh(\gamma_s^n y) \left[ \operatorname{Re} C_s^n \cos\left(n\omega t - \beta_s^n z\right) - \operatorname{Im} C_s^n \sin\left(n\omega t - \beta_s^n z\right) \right] \right\} \right\},$$
(3)

где  $C_{\pm s}^{n} = A_{\pm s}^{n} e^{-\alpha_{\pm s}^{n} z}$  – постоянные коэффициенты, имеющие смысл амплитуд собственных волн.

Величина напряженности поля пространственного заряда  $E_{SC}$  рассчитывается по методике, приведенной в работе [7].

Входной сигнал представляется в виде гармонических составляющих некоторой фундаментальной частоты  $\omega$ , определяющей временной интервал интегрирования по времени до процесса установления стационарного (по величине мощности выходного сигнала) состояния.

#### Анализ многочастотного взаимодействия

При исследовании процесса усиления монохроматического сигнала в ЛБВ с частотой  $\omega_1$ , которая в рамках данной работы считается равной трехсотой гармонике фундаментальной частоты  $\omega_0$ , получено, что коэффициент усиления прибора составляет порядка 19 дБ, а максимальный уровень мощности побочных колебаний – менее –30 дБ от уровня выходной мощности усиливаемого сигнала, что соответствует величине погрешности используемой модели.

Если же дополнительно к сигналу частотой ω<sub>1</sub> подать на вход прибора сигнал с таким же уровнем входной мощности и частотой ω<sub>2</sub>, которая является 299-й гармоникой фундаментальной частоты, то спектр выходного сигнала существенно изменится [6]. В частности, в спектре выходного сигнала появятся дополнительные составляющие с частотами ω<sub>k</sub>, которые удовлетворяют соотношению

$$\omega_k = |m\omega_1 \pm n\omega_2|,$$

где  $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, ...; n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, ..., a \omega_1 и \omega_2$ частоты усиливаемых сигналов. Данное выражение можно переписать в виде



где *l* и *p* – номера гармоник усиливаемых сигналов;  $k = |ml \pm np|$ .

В представленном случае l = 299, а p = 300. Поэтому в спектре выходного сигнала появляются комбинационные составляющие на частотах, которые соответствуют 228-й (m = 2; n = -1), 301-й (m = -1, n = 2) и другим гармоникам фундаментальной частоты (рис. 1, а). На данном рисунке и в дальнейшем черной заливкой отмечены сигналы с ненулевым уровнем входной мощности, без заливки – сигналы с нулевым уровнем входной мощности.



Рис. 1. Спектры выходного сигнала при различных уровнях входной мощности на частоте 301-й гармоники

Из рисунка видно, что появление комбинационных составляющих приводит к искажению усиливаемого сигнала, в частности, к увеличению ширины его спектра. Максимальный уровень выходной мощности генерируемого сигнала составляет порядка -12дБ от уровня выходной мощности усиливаемого сигнала с максимальной амплитудой. Суммарный же уровень выходной мощности не изменяется по сравнению со случаем усиления монохроматического сигнала. Кроме того, следует отметить, что с увеличением т и п уровни выходной мощности генерируемых сигналов резко падают.

Подача на вход прибора третьего сигнала с частотой, соответствующей 301-й гармонике, приводит к еще большему усложнению спектра выходного сигнала. Это связано с тем, что за счет нелинейной группировки электронного потока возникает возможность возбуждения комбинационных составляющих не только усиливаемых сигналов, но и перекрестных комбинаций трех или более сигналов. Так, на рис. 1, б представлен спектр выходного сигнала для случая, когда уровень входной мощности 301-й гармоники равен уровням мощности 300-й и 299-й. Суммарный уровень выходной мощности в этом случае также не изменяется. Уровни выходной мощности крайних усиливаемых сигналов приблизительно равны, а уровень выходной мощности центрального усиливаемого сигнала составляет порядка -4дБ от уровня выходной мощности сигнала с максимальной амплитудой. Это можно объяснить тем, что центральная 300-я гармоника участвует в наибольшем числе комбинаций в выражении (4) с малыми т и п. Максимальный же уровень выходной мощности на комбинационных частотах составляет порядка -5дБ от уровня выходной мощности усиливаемого сигнала с максимальной амплитудой (301-я гармоника) и -2дБ от уровня выходной мощности усиливаемого сигнала с минимальной амплитудой (300-я гармоника). Кроме того, ввод в спектр усиливаемого сигнала на частоте 301-й гармоники приводит к подавлению генерируемых сигналов на частотах, соответствующих 297-й и 303-й гармоник.

На рис. 1, в представлен спектр выходного сигнала ЛБВ в случае, когда уровень входной мощности на частоте 301-й гармоники составляет 70 % от уровня входной мощности 299-й и 300-й гармоник. Суммарный уровень выходной мощности, как и ранее, не изменяется. Максимальный же уровень выходной мощности в данном случае наблюдается уже на частоте, соответствующей 299-й гармонике. Уровни мощности на частотах 300-й и 301-й гармоник приблизительно равны и составляют –4дБ от уровня выходной мощности 299-й гармоники. Также следует отметить, что понижение входной мощности на частоте 301-й гармоники приводит к снижению уровней мощности на комбинационных частотах в правой части спектра относительно центральной 300-й гармоники.

Рис. 1, г соответствует случаю, когда уровень входной мощности на частоте 301-й гармоники составляет 10 % от уровней мощности на частоте 299-й и 300-й гармоник. Суммарный уровень выходной мощности в этом случае также не изменяется, максимальный уровень мощности наблюдается на частоте, соответствующей 300-й гармонике. Максимальный уровень мощности побочных колебаний составляет порядка -7дБ от уровня выходной мощности усиливаемого сигнала с максимальной амплитудой (299-я гармоника) и порядка +14дБ от уровня мощности усиливаемого сигнала с минимальной амплитудой (301-я гармоника). Кроме того, следует отметить, что в этом случае уровень выходной мощности на частоте 301-й гармоники оказывается на -7-8дБ ниже, чем в случае отсутствия данного сигнала на входе усилителя. Помимо этого, также, как и в предыдущем случае, отмечается снижение уровней мощности на комбинационных частотах в правой части спектра относительно центральной 300-й гармоники.

На рис. 2 представлены графики зависимости выходной мощности на частотах, соответствующих 298-й, 299-й, 300-й и 301-й гармоникам от величины N, равной отношению уровня входной мощности 301-й гармоники к уровню входной мощности 300-й гармоники, т. е.  $N = P_{300} / P_{301}$ .



Рис. 2. зависимость уровнеи выходных мощностей спектральных составляющих сигнала от отношения уровня входной мощности 301-й гармоники к уровню входной мощности 300-й гармоники

Из графика следует, что при подаче на вход усилителя сигнала с частотой, соответствующей 301-й гармонике, на выходе превалирует 299-я гармоника до тех пор, пока *N*<1. При *N*=1

превалирующим становится сигнал на частоте 301-й гармоники. С увеличением N коэффициент усиления на центральной частоте (300-я гармоника) существенно снижается. Так, при N=0 он составляет 17, а при N=1-13дБ. С ростом N уровень выходной мощности на частоте, соответствующей 301-й гармонике, сначала снижается, достигая минимума при  $N \approx 0.1$ , а затем возрастает. Причем при N<0,25 данный уровень выходной мощности оказывается ниже, чем в случае отсутствия на входе усилителя сигнала данной частоты. С другой стороны, добавление в спектр входного сигнала данной частоты приводит к росту уровня побочных колебаний на частотах в левой части спектра относительно центральной частоты.



Рис. 3. Зависимость отношения уровней выходных мощностей 301-й и 298-й гармоник от отношения уровней входной мощности 301-й и 300-й гармоник

На рис. 3 представлен график зависимости уровня выходной мощности 301-й гармоники, нормированный на уровень выходной мощности 298-й гармоники от величины отношения N. Из графика следует, что с уменьшением N данное отношение также уменьшается вплоть до  $N \approx 0,1$ . Дальнейшее уменьшение уровня входной мощности на частоте 301-й гармоники приводит к возрастанию уровня колебаний на данной частоте, и при  $N \rightarrow 0$   $P_{301}/P_{298} \rightarrow 1$ . Следует отметить, что при 0 < N < 0,55 превалирующей из пары является 301-я гармоника, а при N > 0,55 - 298-я.

#### Выводы

Таким образом, при усилении двух и более монохроматических волн с близкими частотами происходит возбуждение усилителя на комбинационных частотах, уровень мощности на которых зависит как от частотного заполнения спектра входного сигнала, так и от амплитудного.

При усилении сигнала сложного спектрального состава, представляющего собой суперпозицию двух монохроматических волн, возможно подавление возникающих комбинационных составляющих спектра путем подачи на вход прибора третьего монохроматического сигнала малой мощности. Кроме того, это делает возможным управление сигналами комбинационных частот путем изменения уровня входной мощности подаваемого на вход дополнительного сигнала.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шеин, А. Г. Особенности многочастотного взаимодействия электронного потока с прямой электромагнитной волной в приборах М-типа / А. Г. Шеин, А. Н. Мутовкин // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2004. – Т. 9. – № 2. – С. 4–10.

2. Еськин, Д. Л. Усиление параметрически связанных сигналов в дематроне / Д. Л. Еськин, В. М. Бакулин, А. Г. Шеин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4(42) / ВолгГТУ. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь»; вып. 2). – С. 36–40.

3. Шеин, А. Г. Нелинейный анализ многочастотного режима работы ламп обратной волны М-типа / А. Г. Шеин, М. В. Галац // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2011. – Т. 16. – № 1. – С. 6–9.

4. Авакумов, В. Е. Конкуренция волн в усилителе бегущей волны М-типа / В. Е. Авакумов, А. Г. Шеин, М. К. Мартынова // Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника. – 2013. – № 9. – С. 22–25.

5. Конкуренция сигналов в лампе обратной волны со скрещенными полями / М. В. Галац, Д. Л. Еськин, Е. М. Ильин, А. Г. Шеин // Известия ВолгГТУ / межвуз. сб. науч. ст. № 23(126) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь» ; вып. 8). – С. 38–43.

6. Еськин, Д. Л. Генерация комбинационных частот при усилении сигнала сложного спектрального состава в ЛБВ М-типа / Д. Л. Еськин, Д. Г. Ковтун, А. Г. Шеин // Нелинейный мир. – 2013. – Т. 11. – № 3. – С. 158–163.

7. Шеин, А. Г. О расчете полей пространственного заряда в приборах М-типа / А. Г. Шеин, В. М. Бакулин, А. Н. Мутовкин // Радиотехника и электроника, 2000. – Т. 45. – № 10. – С. 1269–1272.

# — ВОПРОСЫ БИОМЕДИЦИНСКОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ -

УДК 577.352.43(047.3)

# A. A. Никитин, H. B. Грецова A. A. Nikitin, N. V. Gretsova

# МОДЕЛЬ ИОННОГО ТРАНСПОРТА В ЯЧЕЙКЕ ИЗ ДВУХ МЕМБРАН THE MODEL OF IONIC TRANSPORT IN A CELL WITH TWO MEMBRANES

# Волгоградский государственный технический университет Volgograd State Technical University

E-mail: alexnic34@gmail.com, nataliagret@mail.ru

Исследовано влияние внешнего электрического поля на ионный транспорт в биологических мембранах. Математическая модель получена путем модификации модели «реакция-диффузия». Произведен расчет профилей концентраций ионов и потенциала в системе из двух мембран.

Ключевые слова: электродиффузия, мембрана, модель «реакция-диффузия», ионный транспорт.

The shape of ion concentration and potential was calculated in system with two membranes subject to external electrical field influence. The mathematical model was obtained by modifying the "reaction-diffusion" model. *Keywords*: electrodiffusion, membrane, «reaction-diffusion» model, ionic transport.

#### Введение

Электромагнитное излучение является одним из физических факторов окружающей среды, который может оказывать влияние на различные живые организмы. В настоящее время теория воздействия электромагнитных полей на живые объекты в теоретической биофизике далека от завершения. Известно, что электрическое поле оказывает влияние на пассивный транспорт ионов через мембраны. При больших концентрациях ионов можно пользоваться приближением локальной электронейтральности среды. Но при уменьшении концентрации существенную роль начинают играть локальные нарушения электронейтральности (вклад самосогласованного поля растет).

Поэтому актуальным является разработка и исследование математических моделей, описывающих электродиффузионные процессы переноса, а также создание программ, позволяющих проводить расчеты параметров функционирования электромембранных систем с учетом внешних полей.

#### Математическая модель

Рассматриваемая система (рис. 1) представляет собой простейшую одномерную ячейку, на границах которой расположены ионообменные мембраны. Ячейка заполнена раствором бинарного электролита ( $Na^+$ – $Cl^-$ ). Приток и отток ионов может происходить только через мембраны. Электрический заряд в такой системе будет равномерно распределен, т. е. раствор в целом электронейтрален. Но из-за наличия двойного электрического слоя на границах с мембранами возникает разность потенциалов (рис. 1, нижняя часть) в примембранном дельта-слое Нернста [1, 2].

Перенос ионов в диффузионном слое определяется двумя факторами: действием электрического поля и градиентом концентрации.



Рис. 1. Схема процесса электродиффузии ионов бинарного электролита в системе из двух мембран и распределение потенциала в системе (- "-)

Система дифференциальных уравнений (1), описывающая процесс переноса ионов в такой системе, получена из общих физических соображений с использованием уравнений Пуассона, Нернста – Планка, закона сохранения массы. С помощью уравнения Пуассона учитывается наличие пространственного электрического заряда вблизи границы раздела сред.

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_1}{\partial t} &= D_1 \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} + B_1 E^{sc} \frac{\partial c_1}{\partial x} + B_1 E^{ext} \frac{\partial c_1}{\partial x} + H_1 c_1 (z_1 c_1 + z_2 c_2), \\ \frac{\partial c_2}{\partial t} &= D_2 \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2} + B_2 E^{sc} \frac{\partial c_2}{\partial x} + B_2 E^{ext} \frac{\partial c_2}{\partial x} + H_2 c_2 (z_1 c_1 + z_2 c_2), \\ \frac{\partial E^{sc}}{\partial x} &= F \frac{z_1 c_1 + z_2 c_2}{\varepsilon \varepsilon_0}. \end{aligned}$$

Здесь  $C_i$  — молярная концентрация ионов (i = 1, 2);  $D_i = u_i RT$  — коэффициент диффузии,  $u_i$  — подвижность ионов в растворе;  $B_i = u_i z_i F$  подвижность ионов в электрическом поле;  $H_i = \frac{B_i F}{\varepsilon \varepsilon_0}$ ;  $z_i$  — зарядовое число;  $E^{ext} = E_0 cos(\omega t)$  —

внешнее электрическое поле;  $E^{sc}$  – поле пространственного заряда ионов.

Одним из наиболее общих способов замыкания системы стационарных уравнений Нернста – Планка и Пуассона является определение значений концентраций ионов на внешней границе диффузионного слоя [4–6]. В связи с этим граничные условия выбраны следующим образом: на границах ячейки заданы величина падения потенциала в диффузном слое и потоки ионов через поверхность мембраны:

при 
$$x = 0$$
:  $\varphi(0) = -\Delta \varphi$ ,  $J_i(0) = J_i^0$ ,  
при  $x = L$ :  $\varphi(L) = -\Delta \varphi$ ,  $J_i(L) = J_i^L$ .

Здесь // плотность диффузионных потоков через границу раздела фаз (количественная мера селективности мембраны).

Данные граничные условия описывают постоянный поток ионов через поверхность мембраны, что справедливо только при отсутствии внешнего поля, так как ионные каналы являются потенциал-зависимыми [3]. Это означает, что поток ионов через мембрану должен зависеть от внешнего электрического поля и быть переменным.

Для учета такой зависимости широко используем распространенное представление мембраны в виде вакуумного диода с неким заполнением [2].

Ток через вакуумный диод складывается из движения электронов (ток проводимости) и тока смещения в зазоре катод-анод. Тогда полная плотность тока через биологическую мембрану можно представить в виде:

$$J = J_0 + J_c + J_b = J_0 - \sigma E - \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}, \qquad (2)$$

где  $l_0$  – величина плотности тока при отсутствии внешнего электрического поля;  $l_c$  – ток проводимости;  $l_b$  – ток смещения;  $\sigma$  – проводимость канала для данного сорта ионов.

Воспользовавшись формулой электродинамики для проводимости малого диодного промежутка, можно найти проводимости мембраны для интересующих сортов ионов:

$$\sigma = 4\pi R_m^2 \left( \frac{\sigma_0}{d} + \varepsilon \varepsilon_0 \omega k \right)$$

где  $R_{in}^{*}$  – характерный радиус ионного канала;  $\sigma_{o}$  – величина проводимости канала, не зависящая от внешнего поля; d – длина ионного канала.

В [1] приводится следующая формула для расчета <sup>G</sup><sub>0</sub>:

$$\sigma_{\bullet} = \sigma_{02\mathfrak{s}} \frac{c_\ell z_\ell}{SN_A} (1 + \alpha (t - 2\mathfrak{s})).$$

где  $\sigma_{02}$  – проводимость ионов при 25°С ; S – площадь ионного канала;  $N_A$  – число Авогадро;  $\alpha$  – температурный коэффициент электропроводности; t – температура в градусах Цельсия.

Для удобства последующего моделирования систему уравнений (1) можно преобразовать и переписать в безразмерном виде. В качестве новых переменных выбраны следующие величины:  $u_{1,z}$  – безразмерная концентрация ионов, нормированная на характерные концентрации ионов в межклеточной среде [3];  $u_z$  – безразмерный потенциал, нормированный на величину падения потенциала

в двойном электрическом слое;  $X = \frac{x}{L} - \text{ без-}$ 

размерная длина; <sup>•</sup> <sup>t</sup> • – безразмерное время; <sup>t</sup> • – характерное время прохождения ионами ячейки, определяемое из констант химических реакций. Система уравнений в безразмерном виде:

$$\begin{split} \frac{\partial u_{1}}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial X} \bigg[ K_{11} \frac{\partial u_{1}}{\partial X} + K_{12} u_{1} \bigg( \frac{\partial u_{3}}{\partial X} + E^{ext} \bigg) \bigg], \\ \frac{\partial u_{2}}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial X} \bigg[ K_{21} \frac{\partial u_{2}}{\partial X} + K_{22} u_{2} \bigg( \frac{\partial u_{3}}{\partial X} + E^{ext} \bigg) \bigg], \\ &= \frac{\partial}{\partial X} \bigg( \frac{\partial \varphi}{\partial X} \bigg) = - \Phi (u_{1} + \gamma u_{2}). \end{split}$$

Здесь  $K_{i,j}, \Phi, \gamma$  – нормированные коэффициенты.

Для полученной системы граничные условия примут вид:

$$\begin{split} X &= 0: \ u_{\mathtt{s}} = -1, \qquad J_{t}^{\mathtt{o}} = 1 - A\cos(\omega'\tau) + B\sin(\omega'\tau); \\ X &= 1: \ u_{\mathtt{s}} = -1, \qquad J_{t}^{L} = 1 + A\cos(\omega'\tau) - B\sin(\omega'\tau); \\ A &= \frac{\sigma E_{\mathtt{o}}}{J_{t}^{\mathtt{o},L}}, B = \frac{(\varepsilon \varepsilon_{\mathtt{o}} E_{\mathtt{o}})}{J_{t}^{0,L}}, \ \omega' = \omega t_{\mathtt{o}}. \end{split}$$

# Результаты численного моделирования и обсуждение

На рис. 2 приведена картина распределения концентрации ионов натрия под действием электрического поля частотой 15 ГГц с плотностью потока мощности 150 мкВт/см<sup>2</sup>.



Рис. 2. Трехмерная картина распределения концентрации ионов натрия при воздействии ЭМП частотой 15 ГГц



Рис. 3. Распределения концентраций ионов натрия на мембранах в зависимости от времени

На границах области по координате X расположены ионообменные мембраны. При отсутствии внешнего электрического поля распределение имеет гладкий вид, с одним максимумом. При наличии поля появляется диссипативная структура с рядом максимумов и минимумов, распределенных по всему пространству.

На рис. 3 приведены зависимости концентраций ионов натрия на каждой из мембран от времени. Видно, что частота колебаний в точности равна частоте внешнего электрического поля, причем колебания на правой и левой мембранах идут в противофазе, т. е. можно говорить о некоторой перекачке ионов от одной мембраны к другой под действием ЭМП. При этом среднее по времени значение концентрации на границе с мембраной хорошо согласуется с данными других исследователей [4–6].



Рис. 4. Распределение концентрации ионов натрия в зависимости от координаты х

Как видно из рис. 4, под действием электрического поля пространственный максимум концентрации смещается от положения при отсутствии поля (при отсутствии поля максимум лежит строго посередине), причем это смещение непостоянно и зависит частоты внешнего ЭМП.

Стоит отметить, что распределения концентраций второго иона – калия – идентичны по виду приведенным распределениям для натрия, но идут «в противофазе» с ним.

В соответствии с полученными распределениями концентраций было рассчитано распределение потенциала в данной системе с учетом падений потенциалов, вносимых наличием двойных электрических слоев вблизи поверхностей мембран. В распределении потенциала также наблюдаются колебания с частотой внешнего ЭМП.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Маркин, В. С.* Индуцированный ионный транспорт / В. С. Маркин, Ю. А. Чизмаджев. – М. : Наука, 1974. – 252 с.

2. *Иваницкий, Г. Р.* Математическая биофизика клетки / Г. Р. Иваницкий, В. И. Кринский, Е. Е. Сельков. – М. : Наука, 1978. – 308 с.

3. Волькенштейн, М. В. Общая биофизика : монография / М. В. Волькенштейн. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Наука, 1988. – 592 с.

4. Влияние электрического поля на пространственновременные структуры в системе реакция-диффузия / Т. Ю. Плюснина [и др.] // Биофизика. – 2000. – Т. 45. – № 3. – С. 495–501.

5. Чопчиян, А. С. Математическая модель процесса электродиффузии около ионообменной мембраны / А. С. Чопчиян, Е. Н. Коржов // Образование, наука, производство и управление : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – ТНТ. – 2006. – Т. 4. – С. 306–311.

6. Чопчиян, А. С. Модель процесса электродиализа с учетом объемного электрического заряда / А. С. Чопчиян, Е. Н. Коржов // Молодые ученые – науке и производству : Сборник трудов региональной научно-практической конференции. – СТИ МИСиС. – 2007. – Т. 2. – № 4. – С. 224–235.

# Часть 2

# ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

# — ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ ——

УДК 519.213

# M. T. Рзиева M. T. Rzieva

# АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВЕРОЯТНОСТИ СЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ С ТРЕБУЕМЫМИ КОРРЕЛЯЦИОННЫМИ СВЯЗЯМИ ПРИ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ANALYSIS OF THE PROBABILITY OF THE DISTRIBUTIONS OF RANDOM SEQUENCES IN ACCORDANCE WITH THE REOUIRED CORRELATION RELATIONSHIPS IN SIMULATION MODELING

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI»

E-mail: rzieva mt@mail.ru

Рассматривается задача определения плотности вероятности распределения отсчетов воспроизводимой последовательности на уровне одномерного и двумерного законов распределения, определяется возможность установления корреляционной связи при заданном законе распределения случайной величины. Проведен расчет взвешенных коэффициентов при известной корреляционной функции.

Ключевые слова: закон распределения вероятности, двумерное распределение вероятности, коэффициент корреляции, взвешенный коэффициент, корреляционная функция, имитационное моделирование.

The subject of the survey is the problem of the determination of the density of the probability of the reproducible sequence readings distribution on the level of one-and two-dimensional distribution laws; the possibility of the correlation establishing with a given law of the random variable distribution with one- and two-dimensional distribution. The weighted coefficients of the known correlation function are also calculated.

*Keywords*: probability distribution law, two-dimensional probability distribution, correlation coefficient, weighted coefficient, correlation function, simulation modeling.

В настоящее время использование имитационного моделирования – быстро развивающееся и перспективное направление в мире в связи с компьютеризацией всех сфер деятельности человека. В современной метрологии использование имитационного моделирования для метрологического анализа результатов измерений [1–2] весьма перспективно, так как требует меньших затрат времени и средств, с возможностью неоднократного повторения эксперимента.

Для проведения метрологического анализа с использованием имитационного моделирования необходимо обеспечить входное воздействие – сигнал-носитель информации об измеряемой величине, т. е. имитировать входное воздействие в виде числовой последовательности с известными характеристиками. Воспроизведенное входное воздействие можно представить в виде  $\gamma_{HMj}(t) = \{\gamma_{HMj}(t_s)\}_{s=1}^N$ , где N отсчетов в j-м измерительном эксперименте. Такая

числовая последовательность должна иметь требуемые свойства – закон плотности вероятности распределения отсчетов и требуемые корреляционные связи отсчетов. Например, при воспроизведении входного воздействия, представляющего погрешность квантования, необходимо воспроизвести числовую последовательность с равномерным законом распределе-

ния отсчетов на интервале  $\left[-\frac{\Delta}{2},\frac{\Delta}{2}\right]$  ( $\Delta$  – ин-

тервал квантования).

Рассмотрим последовательность  $\gamma_{HMj}(t_s) =$ =  $\{y_j(t_s)\}_{s=1}^N$  с корреляцией смежных отсчетов:  $\{y_j(t_s)\}_s^N = \{x_j(t_s) + ax_j(t_{s-1})\}_{s=1}^N,$  (1)

где последовательность  $\{x_j(t_s)\}_{s=1}^N$  с некоррелированными отсчетами, генерируемая датчиком случайных чисел с распределением вероятности  $w(x_j(t_s))$ ; *а* – взвешенный коэффициент, определяющий корреляционную связь в воспроизводимом входном воздействий  $\gamma_{HMj}(t_s)$ . В [4] описываются методы генерирования случайных последовательностей и операции над случайными числами, включая внесение корреляции.

Требуется определить одномерное и двумерное распределение вероятности  $w(x_j(t_s))$ 

# и $w(y_j(t_{s-1}), y_j(t_s))$ соответственно.

Одномерная плотность вероятности последовательности  $y_j(t_s)$  представляет композицию плотности распределений вероятности последовательностей  $x_j(t_s)$  и  $ax_j(t_{s-1})$ :

$$w(y_j(t_s)) = w(x_j(t_s)) * w(ax_j(t_{s-1})).$$
(2)

Двумерная плотность распределения вероятности в соответствии с соотношением Байеса:

$$w(y_{j}(t_{s-1}), y_{j}(t_{s})) = w(y_{j}(t_{s-1}))w\begin{pmatrix} y_{j}(t_{s}) \\ y_{j}(t_{s-1}) \end{pmatrix} = w(y_{j}(t_{s}))w\begin{pmatrix} y_{j}(t_{s}) \\ y_{j}(t_{s-1}) \end{pmatrix}.$$
 (3)

Последовательность

$$y_{j}(t_{s-1}) = x_{j}(t_{s-1}) + ax_{j}(t_{s-2}),$$

откуда

$$x_{j}(t_{s-1}) = y_{j}(t_{s-1}) - ax_{j}(t_{s-2}).$$
(4)  
Подставив (4) в (1), получим:

$$y_{i}(t_{s}) = x_{i}(t_{s}) - a^{2}x_{i}(t_{s-2}) + ay_{i}(t_{s-1}), \quad (5)$$

где выражение  $x_j(t_s) - a^2 x_j(t_{s-2})$  представляет композицию плотностей распределения  $w(x_j(t_s)) * w(a^2 x_j(t_{s-2})).$ 

Из (5) следует, что условная плотность распределения вероятности последовательности  $y_j(t_s)$  при  $y_j(t_{s-1})$  представляет собой композицию распределений, смещенную на  $ay_j(t_{s-1})$ :

$$w\left(\frac{y_{j}(t_{s})}{y_{j}(t_{s-1})}\right) = w\left(x_{j}(t_{s})\right) * w\left(a^{2}x_{j}(t_{s-2})\right).$$

Таким образом, нельзя требовать получения определенного вида плотности распределения вероятности получаемой последовательности и уровня корреляционного коэффициента, так как внесение коэффициента корреляции искажает исходный закон распределения воспроизводимой последовательности. На рисунках ниже представлен пример трансформации равномерного распределения при a = 0, 6.



Рис. 1. Гистограмма плотности распределения последовательности с равномерным законом



Рис. 2. Гистограмма плотности распределения последовательности с корреляцией смежных отсчетов

На рис. 1 изображена гистограмма плотности вероятности последовательности  $x_i(t_s)$ :

$$w(x_j(t_s)) = \frac{1}{\Delta_x}$$
, где  $x_j \in \left[-\frac{\Delta_x}{2}, \frac{\Delta_x}{2}\right]$ . С внесени-

ем корреляционной связи *а* смежных отсчетов по формуле (1) гистограмма исходной последовательности трансформируется в гистограмму трапецеидальной формы  $w(y_i(t_s))$  (рис. 2).

Рассмотрим следующую задачу: нахождение взвешенных коэффициентов корреляционной связи при заданных коэффициентах корреляции для различных отсчетов в последовательности. В [3] похожая задача рассматривается для смежных отсчетов.

Коэффициент корреляции определяется по формуле

$$\rho(i,i-1) = \frac{B(i,i-1)}{D_i^{1/2} \cdot D_{i-1}^{1/2}},$$
 (6)

где *D* – дисперсия коррелированной последовательности.

Корреляционная функция равна:

или

$$B(i,i-1) = M\left[ (x_{i} - M[x_{i}])(x_{i-1} - M[x_{i}]) \right] = \\ = \begin{vmatrix} M[x_{i}] = 0 \\ M[x_{i-1}] = 0 \end{vmatrix} = M[x_{i}, x_{i-1}] = \\ = M\left[ (x_{i} + ax_{i-1})(x_{i-1} + ax_{i-2}) \right] = M[ax_{i-1}^{2}] = a\sigma_{x}^{2}$$
(7)

Получаем  $\rho_{X}(i,i-1) = \frac{B_{X}(i,i-1)}{D[x']} = \frac{a\sigma_{X}^{2}}{\sigma_{X}^{2}} = a.$ 

Таким образом, коэффициент корреляции для последовательности  $\{x_i\}_{i=1}^N = \{x'_i + ax'_{i-1}\}_{i=1}^N$  с двумя смежными элементами будет равен взвешенному коэффициенту:  $\rho_X(i,i-1) = a$ . Для удобства в дальнейших расчетах обозначим

$$R_{11} = a$$
. (8)

Для последовательности с корреляцией трех последовательных значений

$$\left\{x_{i}\right\}_{i=1}^{N} = \left\{x_{i} + a_{1}x_{i-1} + a_{2}x_{i-2}\right\}_{i=1}^{N}$$

получаем систему уравнений

$$\begin{cases} \rho_X(i,i-1) = a_1 + a_1 a_2; \\ \rho_X(i,i-2) = a_2 \end{cases} \quad \text{или} \begin{cases} R_{11} = a_1 + a_1 a_2; \\ R_{12} = a_2, \end{cases} \quad (9)$$

где  $R_{11}$ ,  $R_{12}$  коэффициенты корреляции для отсчетов i, i-1 (соседних) и i, i-2 (через один отсчет) соответственно.

Для последовательности с корреляцией четырех последовательных значений получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \rho_X (i, i-1) = a_1 + a_1 a_2 + a_2 a_3; \\ \rho_X (i, i-2) = a_2 + a_1 a_3; \\ \rho_X (i, i-3) = a_3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_{11} = a_1 + a_1 a_2 + a_2 a_3; \\ R_{12} = a_2 + a_1 a_3; \\ R_{13} = a_3. \end{cases}$$
(10)

Оценка коэффициента корреляции говорит о том, что смежные значения из последовательности обладают большей корреляционной связью, чем значения, например, первого и четвертого элементов из последовательности.

В работе поставлена задача нахождения взвешенных коэффициентов  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  при заданных коэффициентах корреляции R, решение систем уравнений (8)–(10) закрывает поставленную задачу. Аналитические расчеты нахождения взвешенных коэффициентов имеют свою научную новизну при задании коэффициентов корреляции.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цветков, Э. И. Имитационное моделирование как инструмент метрологического анализа / Э. И. Цветков // Мир измерений. – 2013. – № 6. – С. 9–13.

2. Цеетков, Э. И. Метрологический анализ на основе имитационного моделирования / Э. И. Цветков // Вестник Метрологической Академии Северо-Западного Отделения. – 1999. – Вып. 3. – С. 11–17.

3. Методы математического моделирования радиотехнических систем : учеб. пособие для вузов / Ю. В. Петров [и др.]; под ред. Ю. В. Петрова. – СПб. : БГТУ, 2005. – 111 с.

4. Luc Devroye. Non-Uniform Random Variate Generation/Luc Devroye. – Special ed. – New York: Springer-Verlag, 1986. – 817 p.

#### УДК 621.317

# В. С. Мелентьев, Ю. М. Иванов, В. В. Муратова V. S. Melentiev, Y. M. Ivanov, V. V. Muratova ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО МГНОВЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ СИГНАЛОВ, РАЗДЕЛЕННЫМ В ПРОСТРАНСТВЕ\* МЕТНОД ОГ MEASUREMENT OF INTEGRATED CHARACTERISTICS ON INSTANT VALUES OF SIGNALS, SEPARATED IN SPACE<sup>\*</sup>

Самарский государственный технический университет, Samara State Technical University

E-mail: vs\_mel@mail.ru, fuego27@rambler.ru, muratova1991@yandex.ru

Рассматривается метод измерения интегральных характеристик гармонических сигналов, использующий пространственное разделение мгновенных значений сигналов. Реализация метода обеспечивает сокращение времени измерения параметров. Приводятся результаты анализа погрешности измерения интегральных характеристик из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели.

*Ключевые слова*: интегральные характеристики, мгновенные значения сигналов, гармоническая модель, погрешность.

The method of measurement of integrated characteristics of the harmonious signals, using separation of instant values of signals is considered. Implementation of the method provides a reduction of measurement time parameters. The results of the analysis of measurement error of the integrated characteristics because of a deviation of a real signal from harmonious model. *Keywords*: integrated characteristics, instant values of signals, harmonious model, an error.

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания ФГБОУ ВПО «СамГТУ» (код проекта: 1392).

# Введение

Измерение параметров процессов, являющихся периодическими, широко применяется при контроле и испытаниях электромеханических систем, энергообъектов и электротехнического оборудования, в системах автоматизированного управления технологическими процессами.

При этом особую роль играют гармонические сигналы, которые из-за простоты модели находят чрезвычайно широкое распространение в измерительной технике для анализа и синтеза периодических сигналов.

В настоящее время развивается направление, связанное с разработкой методов и средств измерения интегральных характеристик (ИХ) по отдельным мгновенным значениям гармонических сигналов, не связанным с периодом входного сигнала. Это предполагает два основных способа разделения мгновенных значений: во времени и в пространстве [1].

Второй способ требует формирования дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых по фазе относительно входных, и обеспечивает сокращение времени измерения. При этом упрощение алгоритма измерения и аппаратной реализации обеспечивают методы, использующие в качестве дополнительных ортогональные составляющие сигналов [2].

Одним из существенных недостатков информационно-измерительных систем, реализующих данные методы, является частотная погрешность фазосдвигающих блоков (ФБ), предназначенных для формирования дополнительных сигналов. В результате этого изменение частоты входного сигнала может привести к тому, что угол сдвига фазы ФБ будет отличаться от  $\pi/2$  [3].

Этот недостаток устраняется в методах измерения ИХ, основанных на формировании дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых на одинаковые произвольные углы  $\Delta \alpha$  относительно входных [4]. Однако при реализации данных методов требуется измерение дополнительных мгновенных значений сигналов, взятых через определенные интервалы времени, что приводит к увеличению общего времени определения ИХ.

В статье исследуется новый метод определения ИХ, позволяющий начинать процесс измерения в произвольный момент времени.

#### Метод измерения интегральных характеристик с использованием пространственного разделения мгновенных значений сигналов

Разработанный авторами метод измерения ИХ заключается в следующем. В произвольный момент времени одновременно измеряют мгновенные значения входного напряжения и тока, а также дополнительного напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол  $\Delta \alpha$ . В момент перехода входного напряжения через ноль одновременно измеряют мгновенные значения дополнительного напряжения и тока. ИХ определяют по измеренным мгновенным значениям сигналов.

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 1.



Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Для гармонических входного напряжения  $u_1(t) = U_m \sin \omega t$  и тока  $i(t) = I_m \sin (\omega t + \varphi)$  и дополнительного сигнала напряжения  $u_2(t) =$   $= U_m \sin (\omega t + \Delta \alpha)$  в произвольный момент времени  $t_1$  выражения для мгновенных значений примут вид:

$$U_{11} = U_m \sin \alpha_1; U_{21} = U_m \sin (\alpha_1 + \Delta \alpha);$$
  
$$I_{11} = I_m \sin (\alpha_1 + \phi),$$

где  $U_m$ ,  $I_m$  – амплитудные значения напряжения и тока;  $\omega$  – угловая частота входного сигнала;  $\varphi$  – угол сдвига фаз между напряжением и током;  $\alpha_1$  – начальная фаза входного напряжения в момент времени  $t_1$ .

В момент времени  $t_2$ , когда входное напряжение переходит через ноль, мгновенные значения сигналов будут равны:

$$U_{22} = U_m \sin \Delta \alpha$$
;  $I_{12} = I_m \sin \varphi$ .

Используя мгновенные значения сигналов, после преобразований можно получить выражения для определения основных ИХ:

 среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока

$$U_{CK3} = \frac{\sqrt{2} |U_{11}U_{21}U_{22}|}{\sqrt{4U_{21}^2U_{22}^2 - (U_{21}^2 - U_{11}^2 + U_{22}^2)^2}}; \quad (1)$$

$$I_{CK3} = \left\{ \frac{I_{12}}{2} + \frac{\left[2U_{21}U_{22}I_{11} - I_{12}\left(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right)\right]^2}{2\left[4U_{21}^2U_{22}^2 - \left(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right)^2\right]} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

- активная (AM) и реактивная (PM) мощности

$$P = \frac{\left|U_{11}U_{21}U_{22}\right| \left[2I_{11}U_{21}U_{22} - I_{12}\left(U_{21}^{2} - U_{11}^{2} + U_{22}^{2}\right)\right]}{4U_{21}^{2}U_{22}^{2} - \left(U_{21}^{2} - U_{12}^{2} + U_{22}^{2}\right)^{2}};$$
(2)

$$Q = \frac{I_{12} |U_{11}U_{21}U_{22}|}{\sqrt{4U_{21}^2 U_{22}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2}} .$$
 (4)

Если момент начала измерения совпадает с моментом перехода входного напряжения через ноль, то необходимо произвести дополнительное одновременное измерение мгновенных значений напряжений и тока сразу после перехода сигнала через ноль.

Рассматриваемый метод предназначен для определения интегральных характеристик сигналов с гармоническими моделями. При наличии в сигналах высших гармоник неизбежно возникает погрешность.

#### Анализ погрешности метода из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели

Проведем оценку методической погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели. Для этого используем методику оценки погрешности результата измерения интегральной характеристики как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала [5]. Как известно, погрешность вычисления значения какой-либо функции, аргументы которой заданы приближенно, может быть оценена с помощью дифференциала этой функции. Погрешности функции соответствует возможное ее приращение, которое она получит, если аргументам дать приращения, равные их погрешностям.

Если погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению моделей от реальных сигналов, то предельные значения абсолютных погрешностей определения (например, СКЗ напряжения и АМ) в соответствии с (1) и (2) примут вид:

$$\Delta U_{CK3} = \left[ \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\max}; \quad (3)$$
$$\Delta P = \left[ \left| \frac{\partial P}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_{22}} \right| \right] \Delta I_{\max} +$$

$$+ \left[ \left| \frac{\partial P}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\text{max}}, \quad (4)$$

где  $\Delta U_{\text{max}} = U_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}$ ,  $\Delta I_{\text{max}} = I_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}$  – предель-

ные абсолютные погрешности аргументов, соответствующие наибольшим отклонениям моделей *И И* 

от реальных сигналов; 
$$h_{uk} = \frac{O_{km}}{U_{1m}}$$
 и  $h_{ik} = \frac{I_{km}}{I_{1m}}$  -  
коэффициенты *k*-х гармоник напряжения и тока;

 $U_{1m}$  и  $I_{1m}$  – амплитуды первых гармоник сигналов;  $U_{km}$  и  $I_{km}$  – амплитуды *k*-х гармоник напряжения и тока.

Используя (1) и (2) с учетом предельных значений абсолютных погрешностей (3) и (4), можно определить относительную погрешность измерения СКЗ напряжения и приведенную погрешность измерения АМ:

$$\delta_{U_{CK3}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \left[ \left| \cos \Delta \alpha \cos \left( \alpha_{1} + \Delta \alpha \right) \right| + \left| \cos \Delta \alpha \cos \alpha_{1} \right| + \left| \cos \alpha_{1} \cos \left( \alpha_{1} + \Delta \alpha \right) \right| \right]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^{2}} \left| \sin \alpha_{1} \sin \Delta \alpha \sin \left( \alpha_{1} + \Delta \alpha \right) \right|};$$
(5)  

$$\gamma_{P} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{lk} \left[ 1 + \left| \cos \alpha_{1} \right| \right]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{lk}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^{2}} \left| \sin \alpha_{1} \right|} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{lk}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^{2}} \left| \sin \alpha_{1} \right|} \times \left[ \left| \cos \varphi \cos \Delta \alpha \cos \left( \alpha_{1} + \Delta \alpha \right) + \cos \left( \alpha_{1} + \varphi \right) \right| + \left| \sin \alpha_{1} \sin \varphi \cos \Delta \alpha - 2 \cos \varphi \cos \left( \alpha_{1} + \Delta \alpha \right) \right| + \left| \sin \alpha_{1} \right| \left| \sin \left( \alpha_{1} + \Delta \alpha + \varphi \right) + \sin \left( \alpha_{1} + \Delta \alpha \right) \cos \varphi \right| \right].$$
(5)

Анализ выражений (5) и (6) показывает, что погрешности измерения интегральных характеристик из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели зависят от спектра сигнала, угла сдвига фазы ФБ и момента начала измерения, определяемого начальной фазой  $\alpha_1$ .

Кроме того, погрешность измерения AM зависит также и от угла сдвига фаз между первыми гармониками напряжения и тока  $\phi$ .

На рис. 2 отражены графики зависимости относительной погрешности измерения СКЗ напряжения, содержащего первую и третью гармонику с коэффициентом  $h_{u3} = 0,1$ %, от  $\alpha_1$  и  $\Delta \alpha$  в соответствии с (5).



Рис. 2. Графики зависимости  $\delta_{\textit{Uck3}}$  от  $\Delta \alpha$  и  $\,\alpha_{_1}$ 



Рис. 3. Графики зависимости  $\gamma_P$  от  $\Delta \alpha$  и  $\alpha_1$ 

На рис. 3 представлены графики зависимости приведенной погрешности измерения АМ при наличии в сигналах напряжения и тока первой и третьей гармоник с коэффициентами  $h_{u3} = h_{i3} = 0,1 \%$  от  $\alpha_1$  и  $\Delta \alpha$  при  $\phi = 30^\circ$  в соответствии с (6).

Из рис. 2 и 3 видно, что существуют значения  $\Delta \alpha$ , при которых относительная погрешность измерения СКЗ напряжения и приведенная погрешность измерения AM значительно снижаются.

Проведенный дополнительный анализ показывает, что с увеличением угла сдвига фаз ф погрешность измерения АМ уменьшается.

Аналогично могут быть получены погрешности определения СКЗ тока и РМ и построены графики их зависимости от  $\alpha_1$  и  $\Delta \alpha$  при различных значениях угла сдвига фаз между напряжением и током.

#### Заключение

Разработанный метод измерения ИХ использует один переход сигнала через ноль и формирование только дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого на произвольный угол относительно входного. Это позволяет исключить угловую погрешность ФБ.

Проведенный анализ показывает, что наличие в сигналах высших гармоник приводит к существенному увеличению погрешности измерения интегральных характеристик.

Полученные результаты позволяют выбирать области использования метода в зависимости от спектра сигналов и требований по точности измерения, а также подбирать оптимальные параметры измерительного процесса для обеспечения наименьшей погрешности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Melentiev, V. S.* An improvement in the methods used for the measurement of the integrated characteristics of harmonic signals / V. S. Melentiev, V. I. Batishchev, A. N. Kamyshnikova // Measurement Techniques. – 2011. – V. 54, No.4. – P. 407–411.

2. Мелентьев, В. С. Синтез методов измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, Ю. М. Иванов, А. Е. Синицын // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки». – 2012. – № 3(35). – С. 84–90.

3. *Мелентьев, В. С.* Метод и система измерения интегральных характеристик с использованием ортогональных составляющих сигналов / В. С. Мелентьев, В. В. Муратова, Е. Е. Ярославкина // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки». – 2013. – № 4(40). – С. 206–209.

4. *Мелентьев, В. С.* Методы измерения интегральных характеристик на основе формирования дополнительных сигналов / В. С. Мелентьев, Ю. М. Иванов, А. Е. Синицын // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Серия «Технические нау-ки». – 2013. – № 2(38). – С. 56–63.

5. *Мелентьев, В. С.* Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов / В. С. Мелентьев, В. И. Батищев. – М. : Физматлит, 2011. – 240 с.

УДК519.873

## Р. П. Романенко R. P. Romanenko

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСКОРЕНИЯ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА MATHEMATICAL MODELING DETERMINE THE ACCELERATION OF A MOVING OBJECT

# Волгоградская дистанция сигнализации, централизации и блокировки Volgograd distance of signaling, centralization and blocking

E-mail: romanenkoroman1988@yandex.ru

Представлены различные варианты определения ускорения подвижных объектов. Показано динамическое уравнение движения объекта в осях гринвичской системы координат. Предложен оптимальный выбор способа вычисления ускорений объектов.

Ключевые слова: доплеровские измерения, дифференциальные комбинации фазовых измерений, радиальные ускорения, метод наименьших квадратов, абсолютное ускорение, угловая скорость.

Various options for determining the acceleration of mobile objects. Demonstrates the dynamic equation of motion of the object in axis Greenwich coordinate system. Offered an optimal choice of the method for calculation of the accelerations of objects.

*Keywords*: doppler measurement, differential combinations phase measurements of radial acceleration, the method of least squares, the absolute acceleration, angular speed.

 $\gamma_0$ 

Вопросам синтеза инерциально-спутниковых навигационных систем посвящено довольно много работ, однако проблема эффективного использования разнородной измерительной информации для обеспечения заданной точности навигационных определений именно произвольно движущегося транспортного средства все еще остается весьма актуальной. Это связано с методическими погрешностями существующего способа интеграции систем, хорошо отработанного для воздушных или морских транспортных средств и основанного на линеаризации как навигационных измерений, так и моделей погрешностей измерителей [1, с. 1]. Вследствие отсутствия сегодня адекватных математических моделей погрешностей MEMSдатчиков, пригодных для использования в течение длительных временных интервалов эксплуатации подвижных объектов в совершенно различных условиях, отсутствия заранее известных программных траекторий и возможностей проведения периодических калибровок датчиков, такие способы, например, для автомобильной техники неприменимы.

Абсолютное ускорение W объекта складывается из ускорения силы тяжести и ускорения, вызванного внешними силами, действующими на объект [2, с. 10]. Запишем динамическое уравнение движения объекта в осях гринвичской системы координат  $O_{\eta}$  (О – центр Земли;  $O_{\eta 1\eta 2}$  – плоскость экватора;  $O_{\eta 3}$  – ось вращения Земли):

$$V_{\eta}^{\bullet rcv} = 2\hat{u}_{\eta}V_{\eta}^{rcv} + g_{\eta} + W_{\eta}^{rcv},$$
  

$$g_{\eta} = g_{\eta 0} - (\hat{u}_{\eta})^{2}R_{\eta}^{rcv},$$
(1)

где  $V_{\eta}^{rev}$  – относительная скорость объекта в осях О<sub>η</sub>;  $u_{\eta} = (0, 0, u)^{T}$  – вектор угловой скорости вращения Земли;  $\hat{u}_{\eta}$  – кососимметрическая матрица, соответствующая вектору  $u_{\eta}$ ;  $g_{\eta 0}$ ,  $g_{\eta}$  – удельные составляющие силы тяжести;  $W_{\eta}^{rev}$  – искомое ускорение объекта в гринвичской системе координат.

Соответственно имеем:

$$W_{\eta}^{rcv} = V_{\eta}^{\eta} - 2\hat{u}_{\eta}V_{\eta}^{rcv} - (g_{\eta 0} - (\hat{u}_{\eta})^2 R_{\eta}^{rcv}).$$

Для гравиметрических приложений абсолютное значение нормального ускорения силы тяжести γ с поправкой на высоту h полета определяется при помощи формулы Гельмерта:

$$=9,78030(1+0,005302\sin\varphi^{2}-$$
  
-0,000007sin<sup>2</sup>2\varphi)-0,00014, (2)

где  $\phi$  – географическая широта;  $\gamma_0$  – нормальное ускорение силы тяжести на поверхности Земли.

В гринвичских осях О<sub>1</sub> имеем:

$$g_{\eta} = B \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\gamma \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} -\sin\lambda & -\cos\lambda\sin\phi & \cos\lambda\cos\phi \\ \cos\lambda & -\sin\lambda\sin\phi & \sin\lambda\cos\phi \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \end{pmatrix}$$

где *B* – матрица взаимной ориентации гринвичской и географической систем координат; λ, φ – географические координаты объекта. 2

Предположим, что доступна информация о радиальном ускорении  $A_{pi}$  по линии объект – навигационный спутник:

$$A_{pi} = \frac{\left(V_{\eta}^{sat_{i}} - V_{\eta}^{rcv}\right)^{T} \left(V_{\eta}^{sat_{i}} - V_{\eta}^{rcv}\right)}{p_{i}^{rcv}} - \frac{p_{i}^{rcv^{2}}}{p_{i}^{rcv}} + \frac{\left(R_{\eta}^{sat_{i}} - R_{\eta}^{rcv}\right)^{T}}{p_{i}^{rcv}} \left(V_{\eta}^{\bullet sat} - V_{\eta}^{\bullet rcv}\right), \quad (3)$$

где  $p_i^{rev} = \sqrt{\left(R_{\eta}^{sat_i} - R_{\eta}^{rev}\right)^T \left(R_{\eta}^{sat_i} - R_{\eta}^{rev}\right)}$  – расстояние от спутника до объекта;  $R_{\eta}^{sat_i}, V_{\eta}^{sat_i}$  – гринвичские координаты и вектор относительной скорости навигационного спутника с номером *i*;  $R_{\eta}^{sat}, V_{\eta}^{sat}$  – гринвичские координаты и вектор относительной скорости объекта.

Представим радиальное ускорение  $A_{pi}$  в виде суммы двух составляющих  $A_{pi}^{(I)}, A_{pi}^{(II)}$ , где

$$A_{pi}^{(I)} = \frac{\left(V_{\eta}^{sat_{i}} - V_{\eta}^{rcv}\right)^{T} \left(V_{\eta}^{sat_{i}} - V_{\eta}^{rcv}\right)}{p_{i}} - \frac{p_{i}^{rcv^{2}}}{p_{i}} + \frac{\left(R_{\eta}^{sat_{i}} - R_{\eta}^{rcv}\right)^{T}}{p_{i}^{rcv}} V_{\eta}^{\bullet sat}, \quad (4)$$
$$A_{pi}^{(II)} = -\frac{\left(R_{\eta}^{sat_{i}} - R_{\eta}^{rcv}\right)^{T}}{p_{i}^{rcv}} V_{\eta}^{\bullet sat}. \quad (5)$$

Первая составляющая  $A_{pi}^{(I)}$  может быть вычислена в явном виде при помощи известной информации о координатах и скоростях движения спутника и объекта. Составляющая  $A_{pi}^{(II)}$  содержит информацию о производной  $V_{\eta}$  скорости движения объекта и, соответственно, об искомом ускорении  $W_{\eta}^{rcv}$ .

Предположим, что посредством первичных измерений спутниковой навигационной системы можно оценить величину  $A_{\rm pi}$  радиального ускорения по линии объект – спутник:

$$Z_{A_{pi}} = A_{pi} + r_{pi}, (6)$$

где  $r_{pi}$  – обобщенная погрешность определения величины  $A_{pi}$ .

Введем  $zA_{pi} = Z_{A_{pi}} - A_{pi}^{(I)}$ . Тогда производ-

ную  $V_{\eta}$  можно определить путем решения следующей задачи оценивания:

$$zA_{p} = \begin{pmatrix} zA_{p1} \\ zA_{p2} \\ \cdots \\ zA_{pN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{(1)}^{T} \\ h_{(2)}^{T} \\ \cdots \\ h_{(N)}^{T} \end{pmatrix} V_{\eta}^{\bullet rcv} + \begin{pmatrix} r_{\ddot{p}_{1}} \\ r_{\ddot{p}_{2}} \\ \cdots \\ r_{\ddot{p}_{N}} \end{pmatrix} = HV_{\eta}^{\bullet rcv} + r_{\ddot{p}}, (7)$$
$$h_{(i)}^{T} = -\frac{R_{\eta}^{sat_{i}} - R_{\eta}^{rcv}}{p_{i}},$$

где  $r_{\ddot{p}}$  – обобщенная погрешность измерения; N – число видимых спутников.

Решение задачи (7) по методу наименьших квадратов (при поступлении соответствующих гипотез о шумах измерений  $r_n$ ) имеет вид:

$$V_{\eta}^{\bullet rcv} = \left(H^{T}Q^{-1}H\right)^{-1}H^{T}Q^{-1}zA_{p}, \qquad (8)$$

где Q – ковариационная матрица шумов измерений  $r_{p_i}$ .

С использованием уравнения (1) моделей удельных сил тяжести  $g_{\eta}$  определяется оценка  $\tilde{W}_{\eta}^{rcv}$  ускорения  $W_{\eta}^{rcv}$  объекта:

$$\tilde{W}_{\eta}^{rcv} = \tilde{V}_{\eta}^{\bullet rcv} - 2(\hat{u}_{\eta})V_{\eta}^{rcv} - (g_{\eta 0} - (\hat{u}_{\eta})^2 R_{\eta}^{rcv}).$$
(9)

Вычислить ускорение объекта возможно при помощи доплеровских измерений [3, с. 66], согласно которым частота принятого сигнала, отраженного от цели, может отличаться от частоты излученного сигнала. Рассмотрим три последовательных отсчета  $\nabla \Delta Z_{V_{pi}(t_j-1)}, \nabla \Delta Z_{V_{pi}(t_j)},$  $\nabla \Delta Z_{V_{pi}(t_j+1)}$  двойных разностей доплеровских измерений. С помощью центральной первой разности этих отсчетов сформируем оценку  $\nabla \Delta Z_{V_{pi}(t)}$  производной функции  $\nabla \Delta Z_{V_{pi}(t)}$  в момент времени t<sub>i</sub>

$$\nabla \Delta Z_{V_{pi}(t_j)} = (A_{p_i^{base}}(t_j) - A_{p_i^{rev}}(t_j)) - (A_{p_i^{base}}(t_j) - A_{p_i^{rev}}(t_j)). \quad (10)$$

Соответственно введем в рассмотрение модель:

$$\nabla \Delta Z_{A_{pi}} = \nabla \Delta A_{pi} + \nabla \Delta r_{pi}, \qquad (11)$$

где  $\nabla \Delta r_{pi}$  – обобщенная погрешность определения двойной разности радиальных ускорений.

Двойную разность  $\nabla \Delta A_{pi}$  радиальных ускорений с учетом (3), (4), (5) можно представить в виде суммы двух составляющих:

$$\nabla \Delta A_{pi} = \nabla \Delta A_{pi}^{(I)} + \nabla \Delta A_{pi}^{(II)}, \qquad (12)$$

$$\begin{aligned} \nabla \Delta A_{pi}^{(I)} &= \left( A_{p_{i}^{base}} - A_{p_{i}^{cv}}^{(I)} \right) - \left( A_{p_{z}^{base}} - A_{p_{z}^{rcv}}^{(I)} \right), \\ \nabla \Delta A_{pi}^{(II)} &= - \left( A_{p_{i}^{rcv}}^{(I)} - A_{p_{z}^{rcv}}^{(I)} \right). \end{aligned}$$

Первая составляющая вычисляется в явном виде по известной информации о координатах и скоростях движения навигационных спутников, рабочего приемника и базовой станции. Вторая содержит неизвестный оцениваемый параметр – производную  $(V_{\eta}^{\bullet rcv})$  относительной скорости  $V_{\eta}^{rcv}$  приемника. Соответственно введем:

$$\nabla \Delta z A_{pi} = \nabla \Delta Z A_{pi} - \nabla \Delta A_{pi}^{(I)}.$$
(13)

Тогда для  $\nabla \Delta z A_{pi}$  будет справедлива слелующая молель:

$$\nabla \Delta z A_{pi} = h_{(i)}^{T} \left( V_{\eta}^{\bullet rcv} \right) + \nabla \Delta r_{pi},$$

$$h_{(i)}^{T} = \left( \frac{R_{\eta}^{sat_{i}} - R_{\eta}^{rcv}}{p_{i}^{rcv}} - \frac{R_{\eta}^{sat_{z}} - R_{\eta}^{rcv}}{p_{z}^{rcv}} \right)^{T}.$$
 (14)

Для исключения N – 1 измерений (N видимых спутников) получим следующую линейную модель задачи оценивания величины  $V_{n}^{\bullet}$ :

$$z_{A_{p}} = \begin{pmatrix} z_{A_{p_{1}}} \\ z_{A_{p_{2}}} \\ \cdots \\ z_{A_{pN-1}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{(1)}^{T} \\ h_{(2)}^{T} \\ \cdots \\ h_{(N-1)}^{T} \end{pmatrix} V_{\eta}^{\bullet rcv} + \begin{pmatrix} \nabla \Delta r_{\ddot{p}_{1}} \\ \nabla \Delta r_{\ddot{p}_{2}} \\ \cdots \\ \nabla \Delta r_{\ddot{p}_{N-1}} \end{pmatrix} = HV_{\eta}^{\bullet rcv} + \nabla \Delta r_{\ddot{p}}. \quad (15)$$

Решение задачи (15) по методу наименьших квадратов (при постулировании соответствующих гипотез о шумах измерений  $\nabla \Delta r_{\ddot{p}}$ ) имеет вид:

$$\tilde{V}_{\eta}^{\bullet rcv} = \left(H^T Q^{-1} H\right)^{-1} H^T Q^{-1} \nabla \Delta z A_{pi}, \qquad (16)$$

где Q – ковариационная матрица шумов измерений  $\{\nabla \Delta r_{ii}\}$  .

Далее для определения оценки ускорения  $\tilde{W}_{n}^{\bullet rev}$  используется уравнение (9).

Повышение точности измерения достигается за счет того, что значение числа импульсов доплеровского сигнала можно измерить более просто и более точно, чем величину малых временных интервалов с точностью единицы пикосекунд, а также за счет независимости результата измерения числа доплеровских импульсов от амплитуды дистанционного сигнала.

Определить ускорение объекта возможно и при помощи дифференциальных комбинаций

фазовых измерений. Описываемый алгоритм отличается от представленного выше только иным способом формирования измерений, содержащих полезную информацию об ускорении объекта. Поэтому ограничимся лаконичным комментариями.

Рассмотрим три последовательных дифференциальных фазовых отсчета:  $\nabla \Delta Z_{\varphi_i}(t_j - 1)$ ,  $\nabla \Delta Z_{\varphi_i}(t_j), \nabla \Delta Z_{\varphi_i}(t_j + 1)$ . С помощью центральной второй разности осуществим численное дифференцирование этих отсчетов. Результатом данной процедуры станет оценка  $\nabla \Delta Z_{A_{p_i}}(t_j)$ 

двойных разностей 
$$\nabla \Delta Z_{A_{pi}} = \left(A_{p_i^{base}} - A_{p_i^{rev}}\right) - \left(A_{A_{pi}} - A_{A_{pi}}\right)$$
 радиальных ускорений по лини

 $-\left(A_{p_{z}^{base}} - A_{p_{z}^{rev}}\right)$  радиальных ускорений по линиям приемники – спутники в момент  $t_{j}$ :

$$\nabla \Delta Z_{A_{p_i}}(t_j) = \lambda \frac{\nabla \Delta Z_{\varphi_j}(t_j+1) - 2\nabla \Delta Z_{\varphi_j}(t_j) + \nabla \Delta Z_{\varphi_j}(t_j-1)}{\Delta t^2},$$
(17)

где  $\Delta t = t_{j+1} - t_j = t_j - t_{j-1}$ .

Как и при определении ускорения объекта при помощи доплеровских измерений, введем:

$$\begin{split} \nabla \Delta z A_{pi} &= \nabla \Delta Z A_{pi} - \nabla \Delta A_{pi}^{(I)} ,\\ \text{где } \nabla \Delta A_{pi}^{(I)} &= \left( A_{p_{i}^{base}} - A_{p_{i}^{rv}}^{(I)} \right) - \left( A_{p_{z}^{base}} - A_{p_{z}^{rv}}^{(I)} \right) \text{ и со-}\\ \text{ставляющие } A_{p_{(*)}^{base}} , A_{p_{(*)}^{rv}}^{(I)} \text{ определяются формула-}\\ \text{ми (3), (4), (5).} \end{split}$$

Тогда в соответствии с (14), (15) модель залего дачи оценивания вектора  $V_{\eta}$  примет вид:

$$zA_{pi} = \begin{pmatrix} \nabla \Delta zA_{p1} \\ \nabla \Delta zA_{p2} \\ \dots \\ \nabla \Delta zA_{pN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{(1)}^{T} \\ h_{(2)}^{T} \\ \dots \\ h_{(N-1)}^{T} \end{pmatrix} V_{\eta}^{\bullet rcv} + \left( \begin{pmatrix} \nabla \Delta r_{\phi} \\ \nabla \Delta r_{\phi} \\ \dots \\ \nabla \Delta r_{\phi} \\ \dots \\ \nabla \Delta r_{\phi(N-1)} \end{pmatrix} = HV_{\eta}^{\bullet rcv} + \nabla \Delta r_{\phi}, (18)$$

$$h^{T} = \left( R_{\eta}^{sat_{i}} - R_{\eta}^{rcv} - R_{\eta}^{sat_{i}} - R_{\eta}^{rcv} \right)^{T}$$
(10)

$$h_{(i)}^{T} = \left(\frac{R_{\eta}^{sat_{i}} - R_{\eta}^{rcv}}{p_{i}^{rcv}} - \frac{R_{\eta}^{sat_{z}} - R_{\eta}^{rcv}}{p_{z}^{rcv}}\right) .$$
(19)

Здесь через  $\nabla \Delta r_{\phi i}$  обозначена интегральная погрешность измерения, обусловленная численным дифференцированием погрешностей

фазовых измерений. Задача (18), (19) структурно полностью совпадает с аналогичной моделью (14) задачи определения ускорения при помощи доплеровских измерений. Для ее решения также можно использовать метод наименьших квадратов при постулировании соответствующих гипотез о характеристиках погрешности  $\nabla \Delta r_{\ddot{a}}$ .

Практически, на момент измерений, имеется начальное смещение шкал времени, а также их дрейф, приводящие к погрешностям. Компенсация этих погрешностей осуществляется применением разностных измерений при обработке регистрируемых параметров сигналов. При вычислении расстояний между пунктами в обработку измерений включаются преимущественно двойные разности фаз несущих колебаний.

Так же как и при определении скорости при помощи фазовых измерений, алгоритм определения ускорения включает в себя численное дифференцирование двойных разностей фазовых измерений. Поэтому здесь остаются в силе замечания о необходимости детектирования и компенсации возможных сбоев фазовых измерений. В связи с этим появляется необходимость применения дополнительных устройств, что существенно увеличит стоимость оборудования. Таким образом, определение ускорения подвижных объектов на основе доплеровских измерений математически является более достоверным и, как показывает практика, эксплуатационные характеристики обладают широким диапазоном рабочего состояния, простотой обслуживания, оптимальным соотношением цены и качества.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конев, Д. С. Интеграция инерциально-спутниковых систем на основе инвариантной модели состояния подвижного объекта. Управление подвижными объектами и навигация / Д. С. Конев. – М., 2013. – 8 с.

2. Голован, А. А. Спутниковая навигация. Задачи обработки первичных измерений спутниковой навигационной системы для геофизических приложений / А. А. Голован, Н. Б. Вавилова ; Московский государственный университет. – М., 2005. – 16 с.

3. Иванов, С. В. Анализ неопределенности предсказательного моделирования сложных систем: усвоение данных и ансамблевые технологии / С. В. Иванов, А. В. Бухановский // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2013. – № 12, Т. 56. – 71 с.

УДК 004.384:004.272:004.414.2

# Э. И. Ватутин, Е. Н. Дремов, И. А. Мартынов, В. С. Титов Е. I. Vatutin, Е. N. Dremov, I. А. Martynov, V. S. Titov МЕТОД ВЗВЕШЕННОГО СЛУЧАЙНОГО ПЕРЕБОРА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИСКРЕТНОЙ КОМБИНАТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ\* МЕТНОД OF WEIGHTED RANDOM SEARCH FOR SOLVING DISCRETE СОМВІNATORIAL OPTIMIZATION PROBLEMS

#### Юго-Западный государственный университет South-weststateuniversity

#### E-mail: evatutin@rambler.ru

В работе предложен итерационный эвристический метод решения задач дискретной комбинаторной оптимизации, основанный на выборе направления движения в пределах комбинаторного дерева с использованием стохастического эвристического критерия. Метода пробирован на задаче поиска кратчайшего пути в графе и характеризуется высокой скоростью сходимости, высокой степенью приближения к оптимуму и хорошим потенциалом для распараллеливания.

Ключевые слова: дискретная комбинаторная оптимизация, теория графов, эвристические методы.

Aniterative heuristic method for discrete combinatorial problems solving is described. Method based on choosing direction within combinatorial tree with using of stochastic heuristic criteria. Given method was tested in the shortest path founding problem and shown that it has high convergence rate, high degree of approximation to the optimum and well parallelized.

Keywords: discrete combinatorial optimization, graph theory, heuristic methods.

Решение многих важных для практики прикладных задач сводится к задачам из области дискретной комбинаторной оптимизации. Некоторые из них могут быть решены быстро с использованием специализированных полиномиальных алгоритмов. К ним относятся задача построения минимального основного дерева, решаемая с использованием алгоритмов

<sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания для Юго-Западного государственного университета на 2014–2017 гг., номер НИР 2246, а также в рамках научной школы НШ-2357.2014.8.

Прима или Краскала [1, 2] за время  $O(N \log N)$ ; задача поиска кратчайших путей в графе, решаемая с использованием алгоритмов Дейкстры или Беллмана – Форда [3, 4] в зависимости от специфики постановки задачи за время  $O(N^2)$ ; задача о назначениях, решаемая с применением венгерского алгоритма (алгоритм Куна – Манкерса) [5, 6] за время  $O(N^3)$  и многие другие. Данные задачи относятся к классу Р и формально считаются быстро решаемыми, однако с ростом размерности задачи время отыскания оптимального решения может быть неприемлемо велико. Существует также большое количество задач, образующих класс NP, для которых неизвестны быстрые полиномиальные алгоритмы или доказано, что их построение невозможно (при условии неравенства классов Р и NP [7]). К ним относятся задачи поиска минимального гамильтонова пути или цикла [8], поиск минимальной раскраски графа [9], выделение клик [10], разбиения графов и множеств [11], поиск изоморфного подграфа в графе [12, 13], решение транспортной задачи [14] и многие другие. Для их решения отыскание оптимального решения в большинстве практически важных случаев невозможно (за исключением задач малой размерности), поэтому применяются различные эвристические подходы, к наиболее известным из которых относятся жадные алгоритмы, ограниченный или случайный перебор, организующие перебор среди подмножества возможных решений. Данные подходы являются универсальными и могут быть использованы для решения любых задач дискретной комбинаторной оптимизации (в отличие от специализированных подходов, не рассматриваемых в рамках данной работы, которые опираются на специфику конкретной задачи и зачастую обеспечивают лучшее качество решений [15, 16]).

При решении задач указанного класса с использованием рассмотренных выше подходов обычно вводится понятие комбинаторного дерева. В процессе формирования решения производится обход всех его ветвей (полный перебор, возможно, с применением стратегии ветвей и границ [17]) путем организации поиска в глубину, либо некоторого подмножества из них ввиду невозможности обхода за приемлемое время всего дерева, число ветвей которого зачастую представляется факториальной или экспоненциальной функцией от размерности задачи. В качестве поясняющего примера рассмотрим известную задачу поиска кратчайшего пути во взвешенном неориентированном графе  $G = \langle A, V \rangle$ , где  $A = \{a_1, a_2, ..., a_N\}$  – множество вершин;  $V = \{v_1, v_2, ..., v_M\} \subseteq A \times A$  – множество ребер, взвешенных весами  $l(v_i)$ ,  $i = \overline{1, M}$ , на примере графа, приведенного на рис. 1.



Рис. 1. Взвешенный неориентированный граф

Допустим, что необходимо нахождение кратчайшего пути из первой вершины в третью. Для этого, применяя стратегию построения и анализа всех возможных путей, необходимо построение и обход в глубину следующего комбинаторного дерева (рис. 2).



Рис. 2. Комбинаторное дерево, соответствующее графу на рис. 1 и возникающее в процессе поиска кратчайшего пути между вершинами 1 и 3

При поиске кратчайшего пути методом полного перебора производится построение всего множества путей

$$\begin{cases} P_1 = [1, 2, 3], P_2 = [1, 2, 4, 3], P_3 = [1, 2, 4, 5, 3], \\ P_4 = [1, 5, 3], P_5 = [1, 5, 4, 2, 3], P_6 = [1, 5, 4, 3] \end{cases},$$

оценка длины каждого из них и выбор оптимального пути  $P^+ = P_1 = [1, 2, 3]$ , длина которого  $L(P_1) = 9$ . При этом производится построение только допустимых путей, а не всех возможных перестановок номеров вершин, число которых равно n!, n = N - 2. При использовании стратегии ветвей и границ часть путей, текущая длина которых превышает текущий рекорд, может быть отброшена на ранних этапах, что в общем случае не спасает от необходимости обхода комбинаторного дерева в глубину.

Жадный подход в данной задаче выражается в попытке идти в ближайшую вершину из текущей, при этом производится обход лишь одной ветви дерева, а метод относится к классу последовательных. Для приведенного примера графа ей соответствует путь  $P_2 = [1, 2, 4, 3]$ , сопоставление длины которого  $L(P_2) = 11$  с длиной оптимального пути наглядно показывает, что жадный подход далеко не всегда приводит к отысканию оптимального решения. Кроме того, в некоторых случаях жадный подход способен приводить в тупик (в данном случае в вершину, из которой невозможно попасть в конечную вершину) и при численной оценке качества решения имеет смысл говорить не только о степени субоптимальности полученного решения, но и о вероятности отыскания решения в принципе. Неоспоримым преимуществом жадного подхода являются малые затраты вычислительного времени.

Стратегия случайного перебора заключается в выборе случайного направления движения из текущей вершины, причем возможные направления движения выбираются равновероятно из множества нерассмотренных. Получаемое при этом решение соответствует одной из ветвей комбинаторного дерева, не являясь в общем случае ни жадным, ни оптимальным. Далее процесс отыскания случайного пути повторяется *C* раз (обычно  $C \ll n!$  для большинства практически важных задач), а из найденных решений выбирается наилучшее. Увеличение числа итераций *C* приводит к линейному росту необходимых затрат вычислительного времени, причем зависимость качества решения от числа итераций имеет вид кривой, изображенной на рис. 3.



Рис. 3. Зависимость качества решения *I* от числа итераций *C* 

С определенного момента увеличение числа итераций *C* приводит к незначительному изменению качества решения и может считаться нецелесообразным, а полученное качество решения как правило несколько отличается в худшую сторону от глобального оптимума  $L^+ = L(P^+)$ .

В некоторых случаях подход не способен обеспечить нахождение решения. Данный итерационный подход требует в C раз больших временных затрат по сравнению с жадным, однако и качество решений оказывается более высоким. Кроме того, различные итерации алгоритма являются независимыми, что делает задачу слабосвязной и позволяет использовать для ее решения широкой спектр параллельных вычислительных средств.

Ввиду того, что при использовании стратегии случайного перебора производится равновероятный выбор направления движения из текущей вершины, данному подходу свойственны сравнительно низкая скорость сходимости решения к условному оптимуму и его невысокое качество (которое все же обычно выше, чем у полученного с использованием жадной стратегии), обусловленные довольно частым посещением «длинных» ребер графа в рассматриваемой задаче, которым в общем случае соответствуют далекие от оптимальных фрагменты решения. С целью снижения влияния указанного недостатка можно использовать комбинированную стратегию выбора направления движения, сочетающую в себе лучшие стороны жадного подхода и случайного перебора.

Следуя данной стратегии, именуемой в дальнейшем взвешенным случайным перебором, при выборе направления движения из текущей вершины *а<sub>тек</sub>* введем в рассмотрение критерий

$$F = f_i \left( 1 + 2d \left( r - 0, 5 \right) \right), \tag{1}$$

где  $f_i$  – локальная оценка качества *i*-го направления движения (для рассматриваемой задачи  $f_i = l(a_{mex}, a_i)$ ); d – величина относительного разброса значений вблизи локальной оценки; r – псевдослучайное число с равномерным распределением на отрезке [0; 1]; минимальное значение критерия F будет соответствовать выбранному направлению движения. Итоговое решение будем формировать аналогично методу случайного перебора путем реализации C попыток движения по комбинаторному дереву с выбором наилучшего.

При d = 0 критерий (1) тождественно равен локальной оценке качества *i*-го направления движения  $f_i$ , а метод, основанный на его использовании, представляет собой жадный подход. При d > 0 в порядок выбора решения вмешивается случайная составляющая, причем диапазон изменения значения критерия F составляет случайную величину с равномерным распределением на отрезке  $[f_i - f_i d; f_i + f_i d]$  (рис. 4).



Рис. 4. Иллюстрация, поясняющая математическую запись критерия (1)

При малых значениях d отрезки, соответствующие диапазонам изменения значения критерия (1) для различных направлений движения, не перекрываются и метод по-прежнему реализует жадный подход. С ростом d отрезки начинают перекрываться, что реализует возможность выбора другого, не жадного, направления движения с некоторой вероятностью. При значениях  $d \gg 1$  жадные оценки решения  $f_i$  не играют решающей роли при выборе направления движения, определяемого случайной составляющей, что делает метод похожим на случайный перебор (рис. 5).



Рис. 5. Иллюстрация к выбору направления движения: *а* – жадный подход; *б* – взвешенный случайный перебор; *в* – случайный перебор

Таким образом, метод, основанный на использовании локального критерия F, представляет собой компромиссный вариант между жадным подходом и случайным перебором. Настроечным параметром в его составе является значение величины d, характеризующее относительную ширину отрезка значений критерия F. Вызывает интерес выявление оптимального значения величины d, для которого качество решений будет максимальным, а необходимое число итераций C – минимальным. Для этого был реализован соответствующий вычислительный эксперимент, в ходе которого производилась генерация выборки псевдослучайных неориентированных графов  $S = \{G_1, G_2, ..., G_K\}$  объемом  $K = 1\,000$  с числом вершин N = 50 и дуг  $M = 2\,205$  (90 % от максимально возможного), веса  $l(v_i)$  которых выбирались псевдослучайно в диапазоне [0;1]. Для каждого графа псевдослучайно производился выбор начальной и конечной вершин и осуществлялся поиск кратчайшего пути с использованием алгоритмов, основанных на жадном, случайном и взвешенном случайном подходах. Качество оптимального решения оценивалось с использованием алгоритма Дейкстры [3]. Результаты известных подходов представлены в таблице, приведенной ниже; зависимости усредненного качества решений и числа итераций, необходимого для его отыскания при использовании взвешенного жадного подхода, от значения d – на рис. 6; оценки относительных затрат вычислительного времени приведены в работе [18].



Рис. 6. Зависимости усредненного качества решений (a) и числа итераций  $(\delta)$  от величины относительного разброса d

Метод	Средняя длина пути	Проигрыш оптимальному решению	Число итераций
Дейкстры	0,103	-	-
Жадный	0,956	9,3 раза	-
Случайный	0,275	2,7 раза	1 000
	0,207	2,0 раза	2 000
	0,172	1,7 раза	5 000
	0,163	1,6 раза	10 000
Взвешенный случайный (d = 1)	0,138	1,3 раза	не более 1000, в среднем 202

Результаты вычислительного эксперимента

При других исходных данных (число вершин и дуг в графе, использование ориентированных графов) экспериментальные кривые качественно остаются схожими. Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов. Прежде всего, данные рис. 6 показывают, что оптимальным значением для величины относительного разброса является значение d = 1: усредненная длина путей с его использованием получается минимальной, а значение необходимого числа итераций – приемлемым. При уменьшении указанного значения в диапазоне 0,3 < d <1 число итераций остается практически неизменным при монотонном ухудшении интегрального качества решений. Значение в диапазоне  $0 \le d \le 0.3$  характеризуется меньшим числом итераций, но еще худшими значениями интегрального качества решений, что, по-видимому, объясняется недостаточной степенью перекрытия интервалов критерия F и достаточно большой остаточной «жадностью» подхода. Значения в диапазоне  $1 \le d \le 1, 2$  приводят к резкому (до 3 раз) увеличению числа итераций при резком монотонном возрастании средней длины путей. При значениях *d* > 1,2 необходимое число итераций несколько снижается, а качество решений монотонно ухудшается. Подстановка полученного оптимального значения  $d^* = 1$  в выражение (1) позволяет упростить критерий, используемый для выбора направления движения, до

$$F = f_i r$$

(константный множитель 2 опущен), что является нетривиальным следствием вычислительного эксперимента.

Решения, получаемые с использованием рассмотренного взвешенного случайного подхода, характеризуются существенно лучшей степенью близости к оптимуму и более высокой скоростью сходимости (соответственно, меньшими вычислительными затратами) по сравнению со случайным перебором. При этом задача остается слабосвязанной, что допускает ее эффективное распараллеливание.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. R. C. Prim. Shortest connection networks and some generalizations // Bell System Technical Journal, 36 (1957), pp. 1389–1401.

2. Joseph. B. Kruskal. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem // Proc. AMS. 1956. Vol 7, No. 1. pp. 48–50.

3. E. W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik. V. 1 (1959), pp. 269–271.

4. *R. Bellman*. On a Routing Problem // Quarterly of Applied Mathematics. 1958. Vol 16, No. 1 (1958). pp. 87–90.

5. H. W. Kuhn. The Hungarian Method for the assignment problem // Naval Research Logistics Quarterly. 2:83–97, 1955.

6. J. Munkres. Algorithms for the assignment and transportation problems // Journal of the society for industrial and applied mathematics, 5(1):32–38, 1957.

7. S. Cook. The complexity of theorem proving procedures // Proceedings of the third annual ACM symposium on theory of computing. pp. 151–158. 1971.

8. https://ru.wikipedia.org/wiki/Гамильтонов граф

9. https://ru.wikipedia.org/wiki/Раскраска графов

10. https://ru.wikipedia.org/wiki/Клика (теория графов)

11. https://ru.wikipedia.org/wiki/Разбиение графа

12. https://ru.wikipedia.org/wiki/Изоморфизм графов

13. Валяев, В. В. Метод определения изоморфизма графов общего вида за полиномиальное время / В. В. Валяев, Э. И. Ватутин // Известия ЮЗГУ. Серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». – № 2. – Ч. 1. – 2012. – С. 200–206.

14. https://ru.wikipedia.org/wiki/Транспортная задача

15. Ватутин, Э. И. Комбинаторно-логические задачи синтеза разбиений параллельных алгоритмов логического управления при проектировании логических мультиконтроллеров : монография / Э. И. Ватутин, И. В. Зотов, М. Ю. Сохен, В. С. Титов. – Курск : Изд-во КурскГТУ, 2010. – 200 с.

16. Ватутин, Э. И. Проектирование логических мультиконтроллеров. Синтез разбиений параллельных графсхем алгоритмов. Saarbrucken: Lambert Academic Publishing, 2011 г. 292 с. ISBN 978-3-8433-1728-3.

17. A. H. Land and A. G. Doig. An automatic method of solving discrete programming problems // Econometrica 28 (3). pp. 497–520. 1960. DOI:10.2307/1910129.

18. Дремов, Е. Н. Сравнение качества решений методов поиска кратчайшего пути в графе / Е. Н. Дремов, Э. И. Ватутин // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации (Распознавание – 2013). – Курск : Изд-во ЮЗГУ, 2013. – С. 249–251.

# ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЙ —

УДК 621.317.08

#### B. H. Hecmepos, A. P. Ju V. N. Nesterov, A. R. Li

# АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ИНВАРИАНТНОСТИ ШЕСТИПЛЕЧЕГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОСТА ANALYSIS OF INVARIANCE CONDITIONS OF SIX SHOULDER MEASURING BRIDGE

ОАО «Самарский электромеханический завод»

JSC «Samara electromechanical plant»

E-mail: nesterov-ntc@rambler.ru

В статье рассмотрен шестиплечий измерительный мост широкого назначения. Выполнен его метрологический анализ и найдены условия его инвариантности относительно внешних возмущающих воздействий. *Ключевые слова*: измерительный мост, условия инвариантности, метрологический анализ, технологический метод.

The article describes the six shoulder measuring bridge the wide application. Made its metrological analysis of the bridge and found the conditions of invariance with respect to external perturbations.

Keywords: measuring bridge, the invariance conditions, metrological analysis, technological method.

Применения параметрических измерительных преобразователей разнообразны по назначению, условиям эксплуатации и метрологическим требованиям [1]. При этом к недостаткам неравновесных измерительных мостов и делителей напряжения, существенно ограничивающим области их практического использования, относят нелинейность функций преобразования и влияние на результат измерения нестабильности источников питания [2]. Указанные недостатки устранены в классе двухканальных параметрических измерительных преобразователей [3], отличающихся инвариантностью к нестабильности источников питания и принципиальной линейностью функций преобразования. Однако жесткие условия эксплуатации, сопровождающиеся большим количеством возмущающих факторов, налагают еще более высокие требования на измерительные преобразователи в целом и параметрические измерительные преобразователи, в частности, а решения, предложенные в [3], иногда оказываются неэффективными. Это касается тех случаев, когда конструктивно не удается реализовать принцип «симметричной» передачи возмущающих воздействий в оба измерительных канала измерительного преобразователя [4]. Поэтому вопросы дальнейшей разработки и применения методов, обеспечивающих стабильность измерительных преобразователей в жестких эксплуатационных условиях, актуальны до настоящего времени.

В работах [4, 5] даны методообразующие признаки технологического метода обеспечения инвариантности измерительных преобразователей относительно внешних возмущающих воздействий. Они формулируются следующим образом: 1) наличие в структуре системы q элементов ( $q \ge 2$ ), подверженных влиянию со стороны влияющих факторов  $\zeta_i$ ;

 реализуемость специальных технологических мероприятий, приводящих к «дифференциально-симметричному» действию влияющих факторов на параметры входящих в систему элементов:

$$\left\{\frac{\Delta k_{ir}(\zeta_j)}{k_{ir0}} - \frac{\Delta k_{il}(\zeta_j)}{k_{il0}}\right\} \to 0, \ r \neq l \ ; \ r, l \in q \ , \ (1)$$

где  $\Delta k_{ir}(\zeta_j), \Delta k_{il}(\zeta_j)$  – отклонения k-го параметра, соответственно, r-го и l-го элементов i-го канала преобразования от номинальных значений  $k_{ir0}, k_{il0}$  под действием влияющих факторов  $\zeta_j$ ;

3) выполнение критерия:

$$\Delta F = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{q} \frac{\partial F}{\partial Y_{i}} \frac{\partial Y_{i}}{\partial k_{ij}(\zeta_{j})} \Delta k_{ij}(\zeta_{j}) \rightarrow 0, \quad (2)$$

где F — результирующая функция преобразования системы;  $Y_i$  — функция преобразования i-го канала преобразования; n — количество каналов.

В предельном случае, если выражения вида (1) превратятся в тождество, критерий (2) достигает нулевого экстремума, и можно говорить об абсолютной инвариантности преобразователя относительно возмущающих воздействий, реализующейся за счет соответствующих технологических мероприятий. Однако такой случай в реальных условиях не достижим. Поэтому принципиальное значение приобретает задача поиска технологических мер, приводящих к возможно более строгому выполнению критерия (2), на котором и базируется методика выявления такого технологического «ноу-хау». Поскольку левая часть критерия (2) представляет собой выражение погрешности, возникающей вследствие действия возмущающих факторов на составляющие преобразователь элементы, то, приравняв ее нулю и осуществив необходимые преобразования, представляется возможным в аналитическом виде

$$\frac{\Delta k_{ir}(\zeta_j)}{k_{ir0}} = \frac{\Delta k_{il}(\zeta_j)}{k_{il0}}, \quad r \neq l; \quad r, l \in q \qquad (3)$$

найти условия минимизации названной погрешности. Последние и определят технологическое «ноу-хау», формулировка и физическая реализуемость которого в каждом конкретном случае зависят от направления и механизма воздействия возмущающих факторов и конструктивно-технологического исполнения устройства.

Рассмотрим реализацию методики на примере шестиплечего измерительного моста, схема которого представлена на рисунке.





В данной схеме две измерительные диагонали. Сигнал  $U_1$  снимают с вершин соединения элементов 3, 5 и 2, 6, а сигнал  $U_1$  – с вершин соединения элементов 4, 6 и 1, 5:

$$U_{1} = \frac{E\left\{\left[\left(R_{1} - \Delta R\right) + R_{5}\right]\left[\left(R_{4} - \Delta R\right) + R_{6}\right] - \left(R_{2} + \Delta R\right)\left(R_{3} + \Delta R\right)\right\}}{\left[\left(R_{1} - \Delta R\right) + \left(R_{3} + \Delta R\right) + R_{5}\right]\left[\left(R_{2} + \Delta R\right) + \left(R_{4} - \Delta R\right) + R_{6}\right]};$$
(1)

$$U_{2} = \frac{E\left\{\left[\left(R_{1} - \Delta R\right)\left(R_{4} - \Delta R\right)\right] - \left[\left(R_{3} + \Delta R\right) + R_{5}\right]\left[\left(R_{2} + \Delta R\right) + R_{6}\right]\right\}}{\left[\left(R_{1} - \Delta R\right) + \left(R_{3} + \Delta R\right) + R_{5}\right]\left[\left(R_{2} + \Delta R\right) + \left(R_{4} - \Delta R\right) + R_{6}\right]},$$
(2)

где E - ЭДС источника питания;  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  – начальные значения сопротивлений первичных преобразователей 1–4;  $\Delta R$  – приращение значений сопротивлений первичных преобразователей 1–4;  $R_5$  и  $R_6$  – значения сопротивлений резисторов 5 и 6.

Сигналы (1) и (2) поступают, соответственно, на входы измерительных усилителей 8 и 9, а далее, как показано на рисунке – на сумматор 10 и дифференциальный усилитель 11.

В результате на выходе устройства деления 12 получаем:

$$\frac{U_2^* + U_1^*}{U_2^* - U_1^*} = \frac{K_2 U_2 + K_1 U_1}{K_2 U_2 - K_1 U_1},$$
(3)

где  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты усиления по напряжению измерительных усилителей 8 и 9 соответственно, а  $U_1$  и  $U_2$  – определяются выражениями (1) и (2).

При  $K_1 = K_2 = K$ ,  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$  и  $R_5 = R_6 = R_0$  функция преобразования устройства становится линейной и не содержащей в своем составе параметров источника питания:

$$F = \frac{U_2^* + U_1^*}{U_2^* - U_1^*} = \frac{2\Delta R}{R_0}.$$
 (4)

Прототип данного измерительного преобразователя описан в [6], где отмечено, что условием инвариантности схемы относительно воздействия влияющих факторов на ее элементы является использование двух высокостабильных резисторов, последовательно включенных в плечи моста. В данном случае речь идет о резисторах 5 и 6 (см. рисунок). Включение высокостабильных резисторов в цепи последовательно с первичными преобразователями и дальнейшая алгоритмическая обработка напряжений, получаемых в таких цепях, где образцовые

=

резисторы соединяются с резисторами, выполняющими функцию датчиков, означает реализацию тестового метода повышения точности измерительных устройств [7], который многократно доказал свою эффективность. Однако для подтверждения эффективности метода в конкретном техническом решении необходим метрологический анализ, подтверждающий достижение ожидаемого эффекта.

В работе [6] представлено следующее выражение погрешности рассматриваемой измерительной схемы:

$$\gamma = \frac{\Delta R}{R_0 + \Delta R_0},\tag{5}$$

где  $\Delta R_0$  – отклонение значений сопротивлений резисторов 5 и 6 от номинального значения  $R_0$ , и сделан вывод, что точность измерительного устройства определяется стабильностью параметра  $R_0$ .

Для оценки справедливости последнего утверждения запишем выражение погрешности от действия возмущающих факторов на ключевые элементы рассматриваемой измерительной схемы, нестабильность которых не может не сказаться на ее результирующей погрешности:

$$\begin{split} \Delta F &= \frac{\partial F}{\partial K_{1}} \bigg|_{K_{0}} \Delta K_{1} + \frac{\partial F}{\partial K_{2}} \bigg|_{K_{0}} \Delta K_{2} + \frac{\partial F}{\partial U_{1}^{*}} \frac{\partial U_{1}^{*}}{\partial (R_{1} - \Delta R)} \bigg|_{(R_{1} - \Delta R)} \Delta (R_{1} - \Delta R) + \\ &+ \frac{\partial F}{\partial U_{2}^{*}} \frac{\partial U_{2}^{*}}{\partial (R_{1} - \Delta R)} \bigg|_{(R_{1} - \Delta R)} \Delta (R_{1} - \Delta R) + \frac{\partial F}{\partial U_{1}^{*}} \frac{\partial U_{1}^{*}}{\partial (R_{2} + \Delta R)} \bigg|_{(R_{2} + \Delta R)} \Delta (R_{2} + \Delta R) + \\ &+ \frac{\partial F}{\partial U_{2}^{*}} \frac{\partial U_{2}^{*}}{\partial (R_{2} + \Delta R)} \bigg|_{(R_{2} + \Delta R)} \Delta (R_{2} + \Delta R) + \frac{\partial F}{\partial U_{1}^{*}} \frac{\partial U_{1}^{*}}{\partial (R_{3} + \Delta R)} \bigg|_{(R_{3} + \Delta R)} \Delta (R_{3} + \Delta R) + \\ &+ \frac{\partial F}{\partial U_{2}^{*}} \frac{\partial U_{2}^{*}}{\partial (R_{3} + \Delta R)} \bigg|_{(R_{3} + \Delta R)} \Delta (R_{3} + \Delta R) + \frac{\partial F}{\partial U_{1}^{*}} \frac{\partial U_{1}^{*}}{\partial (R_{4} - \Delta R)} \bigg|_{(R_{4} - \Delta R)} \Delta (R_{4} - \Delta R) + \\ &+ \frac{\partial F}{\partial U_{2}^{*}} \frac{\partial U_{2}^{*}}{\partial (R_{4} - \Delta R)} \bigg|_{(R_{4} - \Delta R)} \Delta (R_{4} - \Delta R) + \frac{\partial F}{\partial U_{1}^{*}} \frac{\partial U_{1}^{*}}{\partial R_{5}} \bigg|_{R_{50}} \Delta R_{5} + \frac{\partial F}{\partial U_{2}^{*}} \frac{\partial U_{2}^{*}}{\partial R_{5}} \bigg|_{R_{50}} \Delta R_{5} = \\ &+ \frac{\partial F}{\partial U_{2}^{*}} \frac{\partial U_{2}^{*}}{\partial (R_{4} - \Delta R)} \bigg|_{(R_{4} - \Delta R)_{0}} + R_{60} \bigg|_{R_{60}} \Delta R_{6} = \\ \frac{2}{\left\{ R_{50} \bigg[ (R_{2} + \Delta R)_{0} + (R_{4} - \Delta R)_{0} + R_{60} \bigg] + R_{60} \bigg[ (R_{1} - \Delta R)_{0} + (R_{3} + \Delta R)_{0} + R_{50} \bigg] \right\}^{2} \times \\ &\times \left\{ \frac{\bigg[ (R_{1} - \Delta R)_{0} + (R_{4} - \Delta R)_{0} + R_{60} \bigg]}{[(R_{2} + \Delta R)_{0} + R_{60} \bigg] \{ [R_{60} + (R_{4} - \Delta R)_{0} \bigg] (R_{2} + \Delta R)_{0} \times \right\} \right\}^{2} \right\}^{2}$$

$$\times \left\{ (R_{1} - \Delta R)_{0} (R_{4} - \Delta R)_{0} - \left[ R_{50} + (R_{3} + \Delta R)_{0} \right] \left[ R_{60} + (R_{2} + \Delta R)_{0} \right] \right\} \times \\ \times \left[ \frac{\Delta (R_{2} + \Delta R)}{(R_{2} + \Delta R)_{0}} - \frac{\Delta R_{6} + \Delta (R_{4} - \Delta R)}{R_{60} + (R_{4} - \Delta R)_{0}} \right] + \left[ R_{60} + (R_{2} + \Delta R)_{0} (R_{4} - \Delta R)_{0} \right] \times \\ \times \left\{ \left[ R_{50} + (R_{1} - \Delta R)_{0} \right] \left[ R_{60} + (R_{4} - \Delta R)_{0} - (R_{2} + \Delta R)_{0} (R_{3} + \Delta R)_{0} \right] \right\} \times \\ \times \left[ \frac{\Delta (R_{4} - \Delta R)}{(R_{4} - \Delta R)_{0}} - \frac{\Delta R_{6} + \Delta (R_{2} + \Delta R)}{R_{60} + (R_{2} + \Delta R)_{0}} \right] \right\} + \left[ \frac{(R_{2} + \Delta R)_{0} + (R_{4} - \Delta R)_{0} + R_{60}}{[(R_{1} - \Delta R)_{0} + (R_{3} + \Delta R)_{0} + R_{50}]} \times \\ \times \left\{ \left[ R_{50} + (R_{1} - \Delta R)_{0} \right] (R_{3} + \Delta R)_{0} \left\{ (R_{1} - \Delta R)_{0} (R_{4} - \Delta R)_{0} - \left[ R_{50} + (R_{3} + \Delta R)_{0} \right] \right\} \times \\ \times \left[ R_{60} + (R_{2} + \Delta R)_{0} \right] \right\} \left[ \frac{\Delta (R_{3} + \Delta R)}{(R_{3} + \Delta R)_{0}} - \frac{\Delta R_{5} + \Delta (R_{1} - \Delta R)}{R_{50} + (R_{1} - \Delta R)_{0}} \right] + \left[ R_{50} + (R_{3} + \Delta R)_{0} \right] \times \\ \times \left[ R_{60} + (R_{2} + \Delta R)_{0} \right] \right\} \left[ \frac{\Delta (R_{3} + \Delta R)}{(R_{3} + \Delta R)_{0}} - \frac{\Delta R_{5} + \Delta (R_{1} - \Delta R)}{R_{50} + (R_{1} - \Delta R)_{0}} \right] + \left[ R_{50} + (R_{4} - \Delta R)_{0} \right] \right\} \times \\ \times \left[ \frac{\Delta (R_{1} - \Delta R)}{(R_{1} - \Delta R)_{0}} - \frac{\Delta R_{5} + \Delta (R_{3} + \Delta R)}{R_{50} + (R_{1} - \Delta R)_{0}} \right] \left[ R_{60} + (R_{4} - \Delta R)_{0} \right] \right] \times \\ \times \left[ \frac{\Delta (R_{1} - \Delta R)}{(R_{1} - \Delta R)_{0}} - \frac{\Delta R_{5} + \Delta (R_{3} + \Delta R)}{R_{50} + (R_{3} - \Delta R)_{0}} \right] \left] + \left\{ \left[ R_{50} + (R_{1} - \Delta R)_{0} \right] \left[ R_{60} + (R_{4} - \Delta R)_{0} \right] - \left( - (R_{2} + \Delta R)_{0} \right] \right\} \right] + \left\{ \left[ R_{50} + (R_{1} - \Delta R)_{0} - \left[ R_{50} + (R_{3} + \Delta R)_{0} \right] \right\} \times \\ \times \left[ \left[ R_{60} + (R_{2} + \Delta R)_{0} \right] \right\} \left\{ \frac{\Delta (R_{2} - \Delta R)}{(R_{0}} - \left[ R_{50} + (R_{3} + \Delta R)_{0} \right] \right\} \right]$$

где  $\Delta K_1$ ,  $\Delta K_2$ ,  $\Delta (R_1 - \Delta R)$ ,  $\Delta (R_2 + \Delta R)$ ,  $\Delta (R_3 + \Delta R)$ ,  $\Delta (R_4 - \Delta R)$ ,  $\Delta R_5$ ,  $\Delta R_6$  – отклонения под действием возмущающих факторов параметров соответствующих элементов схемы от номинальных значений;  $K_0$ ,  $(R_1 - \Delta R)_0$ ,  $(R_2 + \Delta R)_0$ ,  $(R_3 + \Delta R)_0$ ,  $(R_4 - \Delta R)_0$ ,  $R_{50}$ ,  $R_{60}$  – номинальные значения соответствующих параметров.

Форма представления погрешности рассматриваемой схемы в виде (6) позволяет легко установить условия, выполнение которых приведет к удовлетворению критерия (2):

$$\frac{\Delta(R_2 + \Delta R)}{(R_2 + \Delta R)_0} = \frac{\Delta R_6 + \Delta(R_4 - \Delta R)}{R_{60} + (R_4 - \Delta R)_0}; \quad (7)$$

$$\frac{\Delta (R_4 - \Delta R)}{(R_4 - \Delta R)_0} = \frac{\Delta R_6 + \Delta (R_2 + \Delta R)}{R_{60} + (R_2 + \Delta R)_0}; \quad (8)$$

$$\frac{\Delta(R_3 + \Delta R)}{(R_3 + \Delta R)_0} = \frac{\Delta R_5 + \Delta(R_1 - \Delta R)}{R_{50} + (R_1 - \Delta R)_0}; \qquad (9)$$

$$\frac{\Delta(R_1 - \Delta R)}{(R_1 - \Delta R)_0} = \frac{\Delta R_5 + \Delta(R_3 + \Delta R)}{R_{50} + (R_3 + \Delta R)_0}; \quad (10)$$

$$\frac{\Delta K_2}{K_0} - \frac{\Delta K_1}{K_0}.$$
 (11)

Выражения (7)–(11) позволяют оценить возможности разных методов повышения точности рассматриваемого устройства. В данном случае речь идет о тестовом [7] и технологическом [4, 5] методах.

Предположим, что в схеме, данной на приведенном выше рисунке, установлены, как того требует тестовый метод, высокостабильные резисторы 5 и 6 с номинальными значениями сопротивлений  $R_{50}$ ,  $R_{60}$ . В этом случае отклонения  $\Delta R_5$ ,  $\Delta R_6$  значений  $R_5$ ,  $R_6$  сопротивлений 5 и 6 от номинальных значений  $R_{50}$ ,  $R_{60}$  будут стремиться к нулю:  $\Delta R_5 \rightarrow 0$ ,  $\Delta R_6 \rightarrow 0$ .

Очевидно, при  $\Delta R_5 \rightarrow 0$  соотношение (9) вступит в противоречие с соотношением (10), а при  $\Delta R_6 \rightarrow 0$  соотношение (7) будет противоречить соотношению (10). Таким образом, использование высокостабильных резисторов 5 и 6 в конкретной технической реализации не только не снизит результирующую погрешность рассматриваемого устройства, но будет служить новым источником дополнительной погрешности.

Проанализируем возможности технологического метода. В соответствии с перечисленными методическими признаками из (7)–(11) можно выявить парные группы элементов схемы, подпадающие под требования метода [4, 5]. В данном случае речь идет об элементах схемы: 2 и 6, 4; 4 и 6, 2; 3 и 5, 1; 1 и 5, 3; 8 и 9.

Технологические мероприятия, направленные на компенсацию внешних возмущений на рассмотренное устройство, формулируются следующим образом:

 – элементы, составляющие группу, должны быть технологически идентичны, например, выполнены из одного и того же материала; изготовлены на основе идентичных комплектующих, взяты из одной партии и т. д.;

 – элементы, составляющие группу, должны находиться в идентичных условиях относительно любых возмущающих воздействий;

 активные элементы, в данном случае измерительные усилители 8 и 9, должны быть одной марки, желательно из одной партии и, при возможности, иметь общий источник питания.

Таким образом, резисторы 5 и 6 в жестких условиях эксплуатации должны быть такими же нестабильными, как резисторы 1, 3 и 2, 4, которые в рассмотренной схеме являются первичными измерительными преобразователями.

Выполнение перечисленных требований позволит максимально приблизиться к условиям (7)–(11), что, в свою очередь, приведет к минимизации дополнительных погрешностей, модель которых представлена выражением (6).

Подводя итоги, отметим, что применение тех или иных методов для повышения точности измерительных устройств должно сопровождаться корректным метрологическим анализом, подтверждающим правильность и эффективность применяемых мер. В противном случае, как показано на рассмотренном примере, результат может не оправдать ожиданий.

В заключение отметим особенность технологического метода, позволяющего из нестабильных комплектующих элементов собирать измерительные преобразователи, обладающие минимальной чувствительностью ко внешним возмущениям.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Измерения в промышленности. Справочное издание. В 3 кн.: пер. с нем. / под ред. П. Профоса. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1990.

Электрические измерения неэлектрических величин / под ред. П. В. Новицкого. – Л. : Энергия, 1975. – 576 с.

3. *Нестеров, В. Н.* Инвариантные параметрические измерительные преобразователи с линейными функциями преобразования / В. Н. Нестеров // Измерительная техника. – 1993. – № 3. – С. 52–55.

4. *Нестеров, В. Н.* Структурный и технологический методы в задачах построения инвариантных измерительных преобразователей / В. Н. Нестеров // Измерительная техника. – 2007. – № 2. – С. 8–12.

5. Нестеров, В. Н. Технология проектирования инвариантных измерительных преобразователей на примере неравновесных измерительных мостов и делителей напряжения / В. Н. Нестеров, А. Р. Ли // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», 2012. – № 3(35). – С. 97–104.

6. Измерительный преобразователь : а. с. 1165263 СССР: МПК G 01 R 17/10, G 01 B 7/18 / В. В. Пащенко; заяв. Пензен. политехн. ин-т. – № 3707017/24-21 ; заявл. 26.12.83 ; опубл. 30.11.85, Бюл. № 44. – 3 с.

7. Бромберг, Э. М. Тестовые методы повышения точности измерения / Э. М. Бромберг, К. Л. Куликовский. – М. : Энергия, 1978. – 176 с.

УДК 621.3

#### М. Г. Скворцов М.G. Skvortsov ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ АВТОНОМНОГО РОБОТА В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ DIAGNOSTICS OF THE STATE OF AN AUTONOMOUS ROBOT IN REAL TIME В октобразоний горидоватаронии ий полиционалий иницерементат

#### Волгоградский государственный технический университет Volgograd State Technical University E-mail: neurnet@mail.ru

Представлены описания традиционной структуры диагностической системы, структурной схемы нейросетевой диагностики состояния робота, иерархической модели объекта. Применение нейросетевой диагностики состояния робота по интегральному параметру позволяет обеспечить режим реального времени (за счет параллельной обработки данных) и сократить объем передаваемой информации (применением обработки и иерархической свертки информации на борту), что облегчает выявление неисправных подсистем и элементов автономного робота после разрушения.

*Ключевые слова*: состояние автономного робота, нейросетевая диагностика состояния по интегральному параметру, иерархическая структура объекта, нейросетевая измерительная система.

Includes descriptions of the traditional structure of the diagnostic system, the structural scheme of neural network diagnosis of the condition of the robot, the hierarchical model is the object. Application of neural network diagnosis of the condition of the robot by the integral parameter allows for real-time (due to parallel processing) and to reduce the amount of information transmitted (using convolution processing and hierarchical information on board) that facilitates the identification of faulty subsystems and elements after the destruction of autonomous robot.

*Keywords*: the autonomous robot state, neural network diagnostics of a condition on an integral parameter, the hierarchical structure of the object, neural network measurement system.

Автономный робот является электронномеханическим устройством, выполняющим рабочие операции со сложными пространственными перемещениями и способным к целесообразному поведению в условиях изменяющейся внешней обстановки. Роботы (беспилотные самолеты, вертолеты; подводные аппараты; автотранспортные средства, космические аппараты) работают в качестве наблюдателя, разведчика и исследователя в труднодоступных, агрессивных и опасных средах (радиоактивных, высокотемпературных, пожаро- и взрывоопасных). Робот, рассматриваемый как объект диагностики, является сложной системой, состоящей из большого количества разнородных компонентов и подсистем (движения, связи, видеонаблюдения, управления).

Для автономных роботов, как сложных технических объектов (СТО), необходима диагностика состояния. Целью диагностики состояния робота является выявление и оповещение о нештатных ситуациях и нарушениях в работе основных элементов и подсистем СТО.

Традиционная структура диагностической системы автономных роботов (рис. 1) состоит из многоканальной измерительной системы, передатчика телеметрии, размещенного на роботе, а также приемника телеметрии с устройством преобразования, отображения данных и оператора (расположенных на командном пункте). Вся обработка большого объема информации производится на командном пункте, оценка состояния робота – оператором.



Рис. 1. Традиционная структура диагностической системы

К регистрируемым параметрам автономных роботов относятся: сигналы с датчиков местоположения, управления, видеонаблюдения в ИК и видимом диапазоне. Вычисляемыми параметрами объекта являются: координаты местоположения с реперными метками на карте местности, направление и скорость движения, состояние основных элементов и подсистем. Из сопоставления регистрируемых и вычисляемых параметров следует необходимость широкого применения новых информационных технологий в обработке и анализе результатов измерений.

Большой объем косвенных результатов измерений, поступающих в режиме реального времени и требующих предварительной обработки, является особенностью задачи оценки состояния СТО. Например, запущенная 9 ноября 2011 года межпланетная станция «Фобос-Грунт» (стоимостью 2 миллиарда долларов), сбилась с курса и упала 16 января 2012 года. Оценить состояние компонент, подсистем и станции в целом не представлялось возможным из-за ограничений времени сеанса связи и полученного на командном пункте объема телеметрии.

Внедрение в диагностике состояния СТО нейросетевых измерительных систем (ИС/НС) является актуальной задачей [1] для обработки в режиме реального времени измеренных косвенных сигналов и последующего анализа данных.

Концепция предложенного класса измерительных систем ИС/НС отличается от известных нейросетевой средой реализации; рассмотрением нейронной сети как супермногоканальной измерительной системы; подходом к диагностике состояния СТО как системным измерениям интегрального параметра (с формированием иерархической структуры СТО, построением интегральных параметров каждого уровня иерархии, совместной регистрацией и анализом изменения диагностических параметров на всех уровнях иерархии).



Рис. 2. Предлагаемая структура нейросетевой диагностической системы

Предлагаемая структура (см. рис. 2) нейросетевой диагностической системы оценки состояния автономного робота состоит из модели контролируемого объекта (робота), устройства сравнения, принятого эталона нормы и передатчика телеметрии. Количество передаваемых на командный пункт сигналов существенно снижается из-за предварительной их обработки на борту робота.

Первичная обработка измеряемых сигналов проводится в нейросетевых измерительных каналах (фильтр, нормализатор, АЦП и масштабирующее устройство). Вторичная обработка данных (определение параметров состояния, построение интегрального параметра) происходит в системных функциональных преобразователях, которые формируются в процессе параметрического синтеза (обучения) [4, 5] на обучающей выборке, учитывающей как требуемое состояние всех компонентов и подсистем, так и наиболее существенные варианты возникновения отклонений параметров СТО. Режим реального времени обеспечивается программно-аппаратной реализацией нейросетевых измерительных систем на нейроускорителе MC4.31 с нейрочипом NM6403 [3, 4].

Проектирование ИС/НС включает построение системной функции (функции формирования системного состояния из частных состояний элементов системы); системного функционального преобразователя для построения интегрального параметра; формирование принятого эталона состояния СТО.

Количественная оценка общего состояния физического объекта (интегральный параметр) определяется как степень выраженности отклонения совокупности показателей компонентов СТО и его подсистем от заданных эталонных значений.

Иерархическая модель робота (рис. 3) представлена уровнем первичных измерений (сигналами датчиков компонентов кинематики, двигателя и т. д.), компонентным уровнем (элементами кинематики, двигателя, исполнительных устройств), уровнем подсистем (движения, видеонаблюдения, управления, местоположения) и уровнем СТО в целом.

Оценка состояния СТО на разных уровнях иерархии проводится по результатам текущих измерений. Контроль состояния на компонентном уровне осуществляется по результатам оценки сигналов соответствующих компонент. На уровне подсистем контроль представлен оценкой состояния подсистем видеонаблюдения, управления, местоположения и движения. На системном уровне состояние объекта оценивается в зависимости от состояния подсистем.



Рис. 3. Иерархическая модель автономного робота

Для моделирования состояния компонентов СТО соответствующего уровня применяются нейросетевые системные функциональные преобразователи [3]. Иерархия системных функциональных преобразований (СФП) аналогична иерархической модели автономного робота, представленной на рис. 3. На нижнем уровне иерархии системный функциональный преобразователь отображает формирование результатов соответствующих измерений (датчиков, видеокамеры) с образованием на выходе первичных интегральных параметров. На компонентом уровне отображается формирование состояния соответствующего компонента робота (по входным сигналам, поступающим с нижних уровней иерархии) с образованием на выходе интегральных параметров двигателя, кинематики. На уровне подсистем их состояние моделируется с образованием на выходе интегральных параметров органов движения, видеонаблюдения, управления и местоположения. Формирование оценки состояния автономного робота в целом осуществляется по входным сигналам от всех подсистем с образованием на выходе интегрального параметра.

Интегральный параметр (количественная оценка состояния, построенная по иерархической структуре СТО) формируется по степени достижения объектом контроля совокупности требуемых показателей состояния (направление и скорость движения, координаты местоположения, исправность элементов и подсистем), соответствующих конкретным областям применения СТО (беспилотные самолеты, вертолеты; подводные аппараты; автотранспортные средства, космические аппараты).

Применение ИС/НС для системной диагностики состояния СТО по интегральному параметру позволяет обеспечить режим реального времени (за счет нейросетевой параллельной обработки данных) и сократить объем передаваемой информации (применением обработки и иерархической свертки информации на борту СТО), что облегчает выявление неисправных подсистем и элементов автономного робота после разрушения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Муха, Ю. П.* Нейросетевые измерительные системы. Диагностика состояния сложных объектов. Кн. 24 : монография / Ю. П. Муха, М. Г. Скворцов. – М. : Радиотехника, 2007. – 336 с.

2. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Российская Федерация. Проектирование нейросетевых измерительных систем для оценки состояния сложных объектов / Ю. П. Муха, М. Г. Скворцов, Д. П. Мамонтов, Е. М. Гребешкова ; правообладатель ВолгГТУ, № 2010616868 ; заявл. 20.08.2010 ; зарег. 14.10.2010.

3. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Российская Федерация. Моделирование нейросетевых измерительных систем / Ю. П. Муха, М. Г. Скворцов, Е. М. Гребешкова ; правообладатель Волг-ГТУ, № 2010616963 ; заявл. 24.08.2010 ; зарег. 18.10.2010. УДК 680.5.01:621.384

# Е. В. Лукьянчиков, А. В. Полунин, Е. Б. Болецкий Е. V. Lukianchikov, А. М. Polunin, E. B.Boletskiy

# СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ЕДИНИЧНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ A METHOD OF A SINGLE IMAGE RESOLUTION ENHANCEMENT

# Юго-Западный государственный университет South-weststateuniversity

E-mail: e-luck@yandex.ru, temp1202@mail.ru

Представлен способ увеличения размера единичного изображения, основанный на вероятностном представлении изображения. Способ отличается от известных сохранением мелких деталей и контуров объектов изображений.

Ключевые слова: обработка изображений, повышение разрешения, супер-разрешение.

A method of a single image resolution enhancement is presented, which is based on a probabilistic image representation. The method differs from the existing methods with a solicitous approach to an image's small details and objects' contours.

Keywords: image processing, resolution enhancement, super-resolution.

Изображения высокого разрешения востребованы во многих областях науки, техники и потребительского рынка. Современные цифровые сенсоры могут выдавать изображения высокого разрешения, однако все они имеют предел разрешающей способности, который можно превзойти при помощи программной обработки изображений.

Во всех изображениях содержится дополнительная информация, которую можно использовать в целях увеличения разрешения отдельной области или всего изображения. Известны методы увеличения разрешения единичных изображений [1, 2]. Данные методы обладают таким недостатком как сглаживание мелких деталей и контуров объектов на изображениях.

Предлагаемый способ раздельно обрабатывает шум, присутствующий на каждом изображении, и мелкие детали с контурами объектов на изображениях, сохраняя высокую степень детализированности изображений. Способ основан на представлении изображения в качестве случайного поля Маркова и определении вероятностных связей мелких деталей изображения с окружающими их точками изображения. Рассмотрим предлагаемый способ.

Обозначим исходное изображение как *A*, а изображение с повышенным разрешением как *B*. Взаимосвязь изображений описывается следующей формулой:

$$A_{i,j} = \frac{1}{p^2} \left( \sum_{k=pi}^{p(i+1)-1} \sum_{l=pj}^{p(j+1)-1} B_{k,l} \right), \tag{1}$$

где  $A_{i,j}$  – точки изображения A;  $B_{k,l}$  – области изображения, соответствующие точкам изо-

бражения *A*; *p* – коэффициент увеличения изображения.

Для вычисления оценки изображения высокого разрешения *В* при данном изображении низкого разрешения *А* выбрано использование оценки апостериорного максимума изображения, которая выражается следующей формулой:

$$B = \arg\max_{B} L(B \mid A).$$
(2)

Изображение можно представить в качестве случайного поля Маркова с плотностью распределения, подчиняющейся функции распределения Гиббса [3, 4].

$$\Pr(B) = \frac{1}{Z} \exp\left(-\frac{1}{\lambda} \sum_{c \in C} V_c(B)\right), \quad (3)$$

где Z – нормализующий коэффициент;  $\lambda$  – «температурный» параметр плотности;  $V_c(B)$  – некоторая функция локальной группы точек c; называемой кликой; C – набор всех клик в изображении [5].

Предположим, что изображение не подвержено зашумлению. Используя формулы (2) и (3), выразим оценочное изображение как

$$\hat{B} = \arg\min_{b\in B} \left\{ \frac{1}{\lambda} \sum_{c\in C} V_c(b) \right\}.$$
 (4)

Аналогичным образом оценочное изображение, подверженное зашумлению Гауссовым шумом, может быть выражено следующим образом:

$$\hat{B} = \arg\min_{b\in B} \left\{ \frac{\left\| A - DB \right\|^2}{2\sigma^2} + \frac{1}{\lambda} \sum_{c\in C} V_c(b) \right\}, \quad (5)$$

где  $D = (A-n)B^{-1}$  – матрица перехода между оригинальным изображением A и увеличенным Bс учетом аддитивного шума n;  $\sigma$  – параметр распределения Гаусса.


Рис. 1. Алгоритм повышения разрешения единичного изображения

Функция  $V_c(b)$  должна обладать свойством выпуклости, симметричности и толерантности к областям разрывов, что позволит легко найти ее глобальный минимум и сделает задачу увеличения разрешения корректной.

В качестве функции *V<sub>c</sub>*(*b*) возьмем функцию Хьюбера:

$$\rho_T(x) = \begin{cases} x^2, & |x| \le T, \\ T^2 + 2T(|x| - T), |x| > T, \end{cases}$$
(6)

где *T* – параметр функции, разделяющий квадратичную и линейную области.

Подставим функцию (6) в функцию (3) и получим следующую формулу, представляющую изображение:

$$\Pr(B) = \frac{1}{Z} \exp\left(-\frac{1}{\lambda} \sum_{c \in C} \rho_T\left(d_c^t B\right)\right), \quad (7)$$

где  $d'_c$  – априорное значение гладкости изображения, получаемое аппроксимацией первой или второй производной по каждой точке изображения A.

Использование функции Хьюбера и поля Маркова позволяет определить ядро модели изображения как

$$\sum_{c \in C} V_c(B) = \sum_{k=0}^{pN_1 - 1} \sum_{l=0}^{pN_2 - 1} \sum_{m=0}^{3} \rho_T(d_{k,l,m}^t B), \qquad (8)$$

где N1, N2 – линейные размеры изображения; m = [0, 3] – индексы векторов, полностью описывающих одну клику.



Рис. 2. Оригинальное изображение



Рис. 3. Увеличение методом бикубической интерполяции



Рис. 4. Увеличение предложенным методом

Внутри области [-*T*; *T*] квадратичный член  $\rho_T(d_c^t B)$  производит оценку по методу наименьших квадратов для данных изображения, сглаживая небольшие шумы. Если значение  $d_c^t B > T$ , то применяется линейно зависимый штраф, и области разрывов, представляющие контуры и мелкие детали оригинального изображения, сохраняются. Для нахождения оценки МАП  $\hat{B}$  минимизируем эту функцию методом градиентного спуска. Алгоритм обработки изображения представлен на рис. 1. На рис. 2–4 показаны результаты применения способа.

Предложенный способ обеспечивает увеличение разрешения единичных изображений с сохранением мелких деталей на изображении. Способ позволяет увеличить качество получаемых изображений за счет использования полей Маркова, позволяющих определить взаимосвязь компонентов изображения на пиксельном уровне, и итеративных минимизационных методов, дающих более качественный результат, чем однопроходные методы фильтрации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chen, T. C.* Image decimation and interpolation techniques based on frequency domain analysis / T. C. Chen, R. J. P. de Figueiredo // IEEE Trans. Commun., vol. COM-32, no. 4, pp. 479–484, 1984.

2. *Glasner, D.* Super-resolution from a single image / D. Glasner, S. Bagon, M. Irani // Computer Vision, IEEE 12th International Conference, pp. 349–356, 2009.

3. *Левич, В.* Курс теоретической физики / В. Г. Левич. – М. : Наука, 1969. – Т. 1. – С. 393–400.

4. *Chen, J.* Video Super-Resolution Using Generalized Gaussian Markov Random Fields / J. Chen, J. Nunez-Yanez, A. Achim // Signal Processing Letters, IEEE, Vol.:19, Issue: 2, pp. 63–66, 2012.

5. Geman, S. Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images / S. Geman, D. Geman // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intellect, Vol. PAMI-6, no. 6, pp. 721–741, 1984.

УДК 004.42

# А. С. Сизов, А. Ю. Цепов А. S. Sizov, А. J. Tsepov

# ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ИНВЕСТИЦИОННОЙ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ МАЛОГО ИННОВАЦИОННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE INVESTMENT ATTRACTIVENESS OF SMALL INNOVATIVE COMPANY

## Юго-Западный государственный университет Southwest State University

### E-mail: artem.tsepov@yandex.ru

Предложено описание разработанного программного обеспечения, позволяющего проводить автоматическую оценку риска инвестирования малого инновационного бизнеса, а также моделирование внешних воздействий на результаты его деятельности.

*Ключевые слова*: ДСМ-метод, оценка инвестиционной привлекательности, инновационное предприятие, нейтрософия.

The description of the developed software allows for automatic assessment of the risks investing small business innovation, and modeling the result of external influences.

*Keywords*: JSM method, evaluation of investment attractiveness, innovative enterprise, neutrosophy.

На современном этапе развития экономики России в сфере телекоммуникации, а также в ряде других отраслей высокими темпами образуются новые малые инновационные предприятия. Чаще всего, такие предприятия представляют собой небольшую группу людей, занимающуюся проектированием и планирующую выпуск какого-либо технического продукта, в частности основных функциональных элементов систем связи (антенн, малошумящих усилителей, каскадов радиоприемных устройств и пр.). Такие предприятия, доведя замысел до определенной стадии реализации, привлекают инвестиции для расширения своего бизнеса.

Безусловно, инвестирование инновационного проекта сопряжено с высокой степенью риска потери всех или части вложенных средств, в результате отклонения проекта от целевых показателей. Поэтому основная задача инвестора заключается в максимально точном прогнозировании результатов его реализации на стадии принятия решения об инвестировании; другими словами, необходимо провести оценку риска инвестирования. Однако данная задача требует одновременного учета множества разнородных качественных и количественных показателей. Анализ традиционных моделей оценки бизнеса говорит о невозможности их применения для оценки малых инновационных предприятий (МИП) [1]. В то же время, в условиях динамичного развития рынка систем и средств свзяи, постоянно появляются и исчезают новые проекты малых предприятий, что требует проводить подобную оценку регулярно, оперативно и с достаточной степенью достоверности.

В работах [1, 2] рассматривался подход к разработке системы поддержки принятия решений (СППР) оценки риска инвестирования МИП, основанной на методах и средствах искусственного интеллекта, в частности, ДСМ-методе автоматического порождения гипотез. В рамках данного подхода предложено рассматривать каждое МИП, как набор свойств, проявляющихся в той или иной степени. Среди этих свойств выделяется одно целевое - инвестиционная привлекательность. Анализируя базу проектов, с помощью системы выявляются сочетания свойств, приводящих к появлению целевого свойства. Эти сочетания называются «плюс-примерами». Аналогично выявляются «минус-примеры». Данные примеры позволяют выдвинуть гипотезу о наличии или отсутствии целевого свойства у МИП, для которого оно не определено, что соответствует случаю прединвестиционной оценки проекта. Для сжатия пространства входящих факторов на входе СППР предложено ввести объединение части данных с использованием OWA оператора Ягера [2].

С целью практической реализации описанного выше подхода, было разработано программное обеспечение JagerDSM. Оно представляет собой приложение, созданное в среде MSVisualC# с подключением к файлу базы данных MSAccess. Пользовательский интерфейс разделен на три вкладки. Первая отображает базу инновационных проектов, позволяет дополнять, редактировать и просматривать ее содержимое.

Кнопка «Задать параметры оператора Ягера» открывает диалоговое окно (рис. 1), позволяющее задать квантификатор, а также веса объединяемых показателей. Результатом объединения является показатель «Уровень конкурентной среды», который автоматически рассчитывается для каждого МИП согласно алгоритму, изложенному в [2].



Рис. 1. Диалоговое окно редактирования параметров ОWA объединения Ягера

Нажатие кнопки «посмотреть/редактировать/удалить МИП» переводит программу в соответствующий режим, где можно задать основные показатели предприятия (в том числе указать наличие/отсутствие целевого свойства), вычислить OWA-результат, а также прикрепить дополнительную информацию к карточке предприятия (текстовую, графическую и др.). Вкладка «ДСМ» дает возможность провести анализ предприятий с использованием ДСМ- алгоритма, а также посмотреть сохраненные ранее эксперименты.

Режим ДСМ-эксперимента позволяет выбрать из базы МИП, исследуемые в рамках текущего эксперимента: с одной стороны, те, для которых известно значение целевого свойства, и которые послужат основанием для формирования «плюс/минус-примеров», с другой стороны – те для которых требуется сформировать гипотезу о наличии целевого свойства (рис. 2).



Рис. 2. Выбор объектов для ДСМ-эксперимента

Кроме того, пользователь имеет возможность указать те свойства, которые будут принимать участие в анализе или наоборот – исключить из него ряд свойств. Поскольку характеристики объектов МИП могут иметь как числовое значение, так и значение выбора из множества, при работе с числовым значением, возникает вопрос, каким образом нужно оценивать определенную характеристику у нескольких объектов МИП на наличие совпадения, так как полное совпадение двух и более числовых показателей маловероятно. В данной реализации алгоритма был выбран метод деления на диапазоны. Если оба значения попадают в один диапазон из множества сформированных на основе входного параметра количества диапазонов и допустимого интервала значений данной характеристики, то эти значения считаются равными. Таким образом, и при формировании гипотез в результате получаем диапазоны, которым должны принадлежать соответствующие характеристики МИП, обладающего целевым свойством. Количество диапазонов задается пользователем для каждой группы свойств отдельно. Увеличение их числа обеспечивает повышение обоснованности гипотез, однако при этом уменьшается вероятность их появления. Вкладка «Параметры формирования гипотез» позволяет пользователю задать ряд ограничений на создание гипотез, в том числе – минимальное число совпадений, необходимое для создания «плюс/минус-примера»; запрет на контрпримеры и ряд других ограничений.

После того, как все параметры эксперимента заданы, необходимо нажать кнопку «Провести эксперимент». На экран выводится таблица исходных данных с фактическими значениями и соответствующими интервалами. Алгоритм формирует кандидаты в гипотезы, под которыми понимаются установленные сочетания свойств исследуемого объекта, указывающие на наличие/отсутствие целевого свойства, но для которых не была проведена проверка на наличие противоречий. В зависимости от целевого свойства объектов, участвующих в сочетании, кандидат в гипотезу становится кандидатом в (+), (-) или (+/-)-гипотезу. Каждое сочетание проверяется на совпадающие характеристики; совпавшие номера характеристик и их конвертированные значения записываются в массив экземпляров кандидатов в гипотезы. Затем исключаются кандидаты в гипотезы, не имеющие совпадений характеристик. Из множеств кандидатов в гипотезы, имеющих равное множество совпавших характеристик, исключаются все, кроме одного, содержащего наибольшее количество объектов. Каждый кандидат в гипотезу проверяется на соответствие контр-примерам, если их количество не превышает значение, заданное соответствующим входным параметром, то данный кандидат доопределяется как гипотеза с соответствующим значением (+), (-) или (+/-). В результате получаем массив ДСМ-гипотез, которые позволяют выяснить, обладает ли объект целевым свойством МИП. Далее целевой пример проверяется на соответствие каждой из гипотез. На основе числа примеров, удовлетворивших целевому объекту (+), (-) или (+/-)-гипотез, делается вывод о рекомендации доопределить целевой пример, как (+), (-) или (+/-)-пример. Проводится проверка казуальной полноты, для этого каждый (+), (-) или (+/-)-пример проверяется на соответствие хотя бы одной гипотезе с соответствующим целевым свойством. Процесс ДСМ-эксперимента выводится в виде журнала, отображающего: количество кандидатов в гипотезы; количество и содержание гипотез; количество и содержание гипотез, соответствующих целевому примеру; количество объектов, прошедших проверку казуальной полноты, и вывод о рекомендации по доопределению целевого примера (рис. 3).

	Гипотезы, соответс (+)- гипотез: 1; (-)- 1. (+) 01; 02; 03;	лотезы, соответствующие целевому объекту: 1 -}-гипотез: 1; (-)-гипотез: 0; (+/-)-гипотез: 0 . (+) 01; 02; 03; С1=7(Сфера=Пищевая промышленность); С14=5(В3=[0,8-1,0]); С15=2(В4=[0,2-0,4]); С17=4(В6=[0,6-0,8]); С20=3(В9=[0,4-0,6									
	Іроверка казуальной полноты: (+)- примеры: 3/3; (-)- примеры: 0/0; (+/-)- примеры: 0/0;										
Вывод:											
	Рекомендуется доопределить целевой объект как (+)- пример										
	•	III		•							
	Провести эксперимент	Задать значение инвестиционной привлекательности целевого МИП да	Задать	Сохранить и Закрыть Закрыть							

Рис. 3. Редактирование показателей, участвующих в ДСМ-эксперименте

Дополнительно в программе предусмотрена возможность нейтрософского когнитивного моделирования воздействия на предприятие сторонних сил. Данный модуль может быть полезен как для моделирования поведения предприятия в определенных рыночных условиях, так и для оценки путей воздействия на проект в целях повышения значений его ключевых показателей.

Для этого осуществляется заполнение нейтрософской матрицы смежности, описывающей характер взаимного влияния показателей. Затем задается вектор воздействия, т. е. перечень показателей на которые необходимо реализовать воздействие, а также его сила. При нажатии кнопки «Найти вектор-результат» запускаются вычисления по алгоритму, рассмотренному в работе [3], результат которых иллюстрирует динамику изменений показателей МИП при отсутствии внешнего воздействия.

Таким образом, разработанное программное обеспечение позволяет проводить оценку риска инвестирования малого инновационного предприятия, а также динамику изменений его основных показателей под воздействием внешних сил. Архитектура программы дает возможность оперативно и регулярно проводить оценку риска инвестирования, накапливать данные и генерировать знания о реализованных инновационных проектах, для управления процессами инвестирования.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сизов, А. С. Автоматизация процессов оценки инвестиционной привлекательности инновационного проекта малого предприятия на основе ДСМ-метода автоматического порождения гипотез / А. С. Сизов, Ю. А. Халин, А. Ю. Цепов // Телекоммуникации. – 2014. – № 2.

 Сизов, А. С. Использование OWA-оператора Ягера для интеграции данных на входе ДСМ-системы оценки риска инвестирования малого инновационного предприятия / А. С. Сизов, Ю. А. Халин, А. Ю. Цепов // Сборник статей по материалам XXIV Международной научнопрактической конференции «Инновации в науке» № 8. Сентябрь 2013 г. Новосибирск.

3. Цепов, А. Ю. Анализ инновационного проекта малого предприятия с использованием нейтрософских когнитивных карт / А. Ю. Цепов // Материалы II Международной научно-практической конференции «Техника и технологии : Роль в развитии современного общества». 4 октября 2013 г.

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА В НАУКЕ, ПРОМЫШЛЕННОСТИ, МЕДИЦИНЕ

УДК 681.2.082

B. H. Hecmepos, Д. B. Hecmepos V. N. Nesterov, D. V. Nesterov

# ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ИНФОРМАТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ СЛОЖНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ FUNDAMENTALSOFOPTICAL MEASUREMENTS OF INFORMATIVE COMPONENTS OF COMPLEX MOVEMENTS

## OAO «Самарский электромеханический завод» JSC «Samara electromechanical plant»

E-mail: nesterov-ntc@rambler.ru

В статье изложены теоретические основы оптических измерений информативных составляющих сложных перемещений подвижных объектов на основе метода многомерных тестов.

*Ключевые слова*: оптические измерения, многокомпонентные перемещения, многомерные тестовые объекты, формальные модели.

In the article theoretical fundamentals of optical measurements of informative components of complex movements of moving objects based on the method of multidimensional tests are stated.

Keywords: optical measurements, multicomponent movements, multidimensional test objects, formal models.

Неселективность известных методов и средств измерения к информативным компонентам измеряемых величин, сформулированная в работах [1-3], является препятствием использования традиционных оптических средств измерения для определения составляющих сложных перемещений подвижных объектов. Решение проблемы найдено в плоскости системного подхода, применяемого для организации процесса измерения. Во многих случаях системный подход связывают с организацией в системе информационной избыточности. Способы обеспечения информационной избыточности различны. Так некорректная задача восстановления координат объекта по его плоскому изображению может быть решена за счет использования бинокулярных систем технического зрения [4]. Все известные методы повышения точности измерительных систем, за исключением консервативных, также базируются на том или ином способе организации информационной избыточности (структурном или временном). В данном случае основой решения поставленных задач является метод измерения, основанный на применении многомерных тестовых объектов и специальной алгоритмической обработке получаемой визуальной информации [5].

Цель метода – по плоскому изображению перемещающегося объекта восстановить реальные значения информативных составляющих перемещений вопреки известной некорректности данной задачи [4].

Сущность метода многомерных тестовых объектов сводится к тому, что для обеспечения процесса измерения информативных составляющих перемещений контролируемого объекта оптическим методом с объектом связывается распределенный в пространстве контрольный объект, обладающий известными с высокой точностью геометрическими параметрами, которые используются в процессе реализации метода в качестве мер [6]. Особенностью метода является то, что известные параметры многомерного тестового объекта отражают многомерность контролируемых перемещений и функционально связываются с ними в процессе формирования соответствующих измерительно-вычислительных алгоритмов. Перечислим методообразующие признаки метода многомерных тестовых объектов: 1) наличие (возможность сформировать) системы из *n* уравнений, асимметричных относительно информативных компонентов  $\mathbf{x}_{1k}(\mathbf{r}, \tau), ..., \mathbf{x}_{pk}(\mathbf{r}, \tau)$  ( $k \in \{x, y, z\}$  – множество координатных составляющих) перемещений соответствующих точек изображения тестового объекта:

$$\mathbf{Y}_{1}(\mathbf{r}, \tau) = \Psi_{1} \{ \mathbf{F}_{1} \{ \mathbf{x}_{1k}(\mathbf{r}, \tau), ..., \mathbf{x}_{pk}(\mathbf{r}, \tau), \mathbf{L}_{1k}, ..., \mathbf{L}_{qk} \} \};$$

$$(n \ge p \ge 2),$$
(1)

$$\mathbf{Y}_{n}(\mathbf{r}, \tau) = \Psi_{n} \{ \mathbf{F}_{p} \{ \mathbf{x}_{1k}(\mathbf{r}, \tau), ..., \mathbf{x}_{pk}(\mathbf{r}, \tau), \mathbf{L}_{1k}, ..., \mathbf{L}_{qk} \} \},$$
  
$$\mathbf{F}_{1} \{ \mathbf{x}_{1k}(\mathbf{r}, \tau), ..., \mathbf{x}_{pk}(\mathbf{r}, \tau), \mathbf{L}_{1k}, ..., \mathbf{L}_{qk} \} \neq ... \neq \mathbf{F}_{p} \{ \mathbf{x}_{1k}(\mathbf{r}, \tau), ..., \mathbf{x}_{pk}(\mathbf{r}, \tau), \mathbf{L}_{1k}, ..., \mathbf{L}_{qk} \},$$
(2)

где  $\mathbf{Y}_{1}(\mathbf{r}, \tau), ..., \mathbf{Y}_{n}(\mathbf{r}, \tau)$  – функции перемещений соответствующих точек изображения контролируемого объекта относительно выбранных (выбранной) на изображении точек (точки) отсчета;  $\mathbf{F}_{1}\{\mathbf{x}_{1k}(\mathbf{r}, \tau), ..., \mathbf{x}_{pk}(\mathbf{r}, \tau), \mathbf{L}_{1k}, ..., \mathbf{L}_{qk}\}, ...,$  $\mathbf{F}_{p}\{\mathbf{x}_{1k}(\mathbf{r}, \tau), ..., \mathbf{x}_{pk}(\mathbf{r}, \tau), \mathbf{L}_{1k}, ..., \mathbf{L}_{qk}\}$  – многокомпонентные векторные функции множества составляющих их информативных компонентов  $\mathbf{x}_{1k}(\mathbf{r}, \tau), ..., \mathbf{x}_{pk}(\mathbf{r}, \tau)$  и компонентов  $\mathbf{L}_{1k}, ..., \mathbf{L}_{qk}$ 

 $\mathbf{L}_{k}$  (г, с), ...,  $\mathbf{L}_{pk}$  (г, с) и компонентов  $\mathbf{L}_{1k}$ , ...,  $\mathbf{L}_{qk}$ *k* -й координатной составляющей  $\mathbf{L}_{k}$  многомерного теста) **L**;

 реализуемость специальных измерительно-вычислительных алгоритмов:

$$\mathbf{x}_{1k}(\mathbf{r},\tau) = f_1 \{ \mathbf{Y}_1(\mathbf{r},\tau), ..., \mathbf{Y}_n(\mathbf{r},\tau) \};$$
.....
, (3)

$$\mathbf{x}_{pk}\left(\mathbf{r},\tau\right) = f_p\left\{\mathbf{Y}_1\left(\mathbf{r},\tau\right),...,\mathbf{Y}_n\left(\mathbf{r},\tau\right)\right\},\right\}$$

условием существования которых при непрерывности и дифференцируемости  $\mathbf{Y}_1(\mathbf{r}, \tau),...,$  $\mathbf{Y}_n(\mathbf{r}, \tau)$  во всем диапазоне измерения является неравенство нулю Якобиана:

$$\det\left[\frac{\partial \mathbf{Y}_{i}(\mathbf{r},\tau)}{\partial \mathbf{x}_{jk}(\mathbf{r},\tau)}\right] \neq 0 \ i = \overline{1,n}, \quad j = \overline{1,p}$$
(4)

Условие (4) обеспечивается реализацией «асимметрии» величин  $\mathbf{Y}_1(\mathbf{r}, \tau), ..., \mathbf{Y}_n(\mathbf{r}, \tau)$  относительно составляющих их компонентов  $\mathbf{x}_{1k}(\mathbf{r}, \tau), ..., \mathbf{x}_{pk}(\mathbf{r}, \tau)$  и  $\mathbf{L}_{1k}, ..., \mathbf{L}_{qk}$ , которая выражена неравенством (2).

Очевидно, что при использовании одноканальной оптической системы функции коэффициенты  $\Psi_1,..., \Psi_n$  одинаковы. Введем коэффициент передачи оптического преобразователя  $\sigma$ . Тогда система уравнений (1) может быть записана в следующем виде:

$$\mathbf{Y}_{1}(\mathbf{r}, \tau) = \sigma \left\{ \mathbf{F}_{1} \left\{ \mathbf{x}_{1k}(\mathbf{r}, \tau), ..., \mathbf{x}_{pk}(\mathbf{r}, \tau), \mathbf{L}_{1k}, ..., \mathbf{L}_{qk} \right\} \right\};$$

$$(n \ge p \ge 2).$$

$$\mathbf{Y}_{n}(\mathbf{r}, \tau) = \sigma \left\{ \mathbf{F}_{p} \left\{ \mathbf{x}_{1k}(\mathbf{r}, \tau), ..., \mathbf{x}_{pk}(\mathbf{r}, \tau), \mathbf{L}_{1k}, ..., \mathbf{L}_{qk} \right\} \right\},$$

$$(5)$$

Опираясь на приведенные в работе [6] положения о многокомпонентной физической величине и многомерном тестовом объекте, определим вид функции **F** связи информативных компонентов  $\mathbf{x}_{1k}(\mathbf{r},\tau),...,\mathbf{x}_{pk}(\mathbf{r},\tau)$  и компонентов  $\mathbf{L}_{1k},...,\mathbf{L}_{qk}$  *k* -й координатной составляющей  $\mathbf{L}_{k}$  многомерного теста **L** в модели (5):

$$\mathbf{F}_{ik}\left\{\mathbf{x}_{1k}\left(\mathbf{r},\tau\right),...,\mathbf{x}_{pk}\left(\mathbf{r},\tau\right),\mathbf{L}_{1k},...,\mathbf{L}_{qk}\right\} = \\ = \sum_{k}^{\left\{x,y,z\right\}} \sum_{u=1}^{q} v_{iuk}\mathbf{L}_{iuk} + \sum_{k}^{\left\{x,y,z\right\}} \sum_{j=1}^{p} \eta_{ijk}\mathbf{x}_{ijk}\left(\mathbf{r},\tau\right), \tag{6}$$

где i – порядковый номер функции связи;  $k \in \{x, y, z\}$  – множество координатных составляющих; u – порядковый номер компонентов многокомпонентного теста  $\mathbf{L}_{iuk}$ ; j – порядковый номер информативных компонентов k-й координатной составляющей многокомпонентного перемещения  $\mathbf{X}_k(\mathbf{r}, \tau)$ ;  $v_{iuk} \in [0,1]$  – весовые коэффициенты, отражающие отсутствие – 0 – или наличие – (0,1] – соответствующей компоненты многокомпонентного теста  $\mathbf{L}_{iuk}$  в модели (6);  $\eta_{ijk} \in [0,1]$  – весовые коэффициенты, отражающие отсутствие – 0 – или наличие – (0,1] – весовые коэфтициенты, отражающие отсутствие – 0 – или наличие – (0,1] – весовые коэфтициенты, отражающие отсутствие – 0 – или наличие – (0,1] – соответствующей информативной компоненты  $\mathbf{x}_{iik}(\mathbf{r}, \tau)$  в модели (6).

Механизм комбинирования коэффициентов  $v_{iux} \in [0,1], v_{iuy} \in [0,1], v_{iuz} \in [0,1], \eta_{ijx} \in [0,1],$ 

 $\eta_{ijy} \in [0,1], \eta_{ijz} \in [0,1]$  в области их определения позволяет, сохраняя универсальный характер модели (6), адаптировать ее к конкретным практическим задачам.

Любое перемещение, в том числе и многокомпонентное, описывается в соответствии с законами и положениями векторной алгебры. При рассмотрении проекции векторных величин на плоскость и введении специальных соглашений, основывающихся на законах векторной алгебры, можно существенно упростить процесс синтеза сложных математических моделей (6), входящих в систему уравнений (5), сделать ее формальной. Для этого введены специальные коэффициенты  $\xi_{iuk}$ ,  $\zeta_{iuk}$ ,  $\gamma_i$ , принимающие значения в соответствии со следующими соглашениями:

$$\xi_{iuk}, \varsigma_{ijk} = \begin{cases} +1, ecnu npoekųuu векторов \mathbf{L}_{iuk}, \mathbf{x}_{ijk} \\ cosnadaют с направлением coomsem-ствующей оси координат;-1, ecnu проекции векторов \mathbf{L}_{iuk}, \mathbf{x}_{ijk} ; (7) \\ не cosnadaют с направлением coomsemcmsyющей оси координат; 0, ecnu coomsemcmsyющая компонента отсутствует 
$$\gamma_i = \begin{cases} +1, ecnu npoekции векторов \mathbf{Y}_i(\mathbf{r}, \tau) \\ cosnadaют с направлением coomsem-ствующей оси координат; \\ -1, ecnu npoekции векторов \mathbf{Y}_i(\mathbf{r}, \tau) \\ npomusonоложны направлению \end{cases}$$
(8)$$

Тогда система уравнений (5) примет следующий скалярный вид:

$$\gamma_{1}Y_{1}(\tau) = \sigma \left\{ \sum_{k}^{\{x,y,z\}} \sum_{u=1}^{q} \xi_{1uk} v_{1uk} L_{uk} + \sum_{k}^{\{x,y,z\}} \sum_{j=1}^{p} \zeta_{1jk} \eta_{1jk} x_{jk}(\tau) \right\}; \\ \dots \\ \gamma_{n}Y_{n}(\tau) = \sigma \left\{ \sum_{k}^{\{x,y,z\}} \sum_{u=1}^{q} \xi_{nuk} v_{nuk} L_{uk} + \sum_{k}^{\{x,y,z\}} \sum_{j=1}^{p} \zeta_{njk} \eta_{njk} x_{jk}(\tau) \right\}, \right\}$$
(9)

соответствующей оси координат

где  $Y_1(\tau), ..., Y_n(\tau)$  – расстояния от выбранных на чувствительной плоскости приемника изображения точек начала отсчета (меток) до

*i*-х точек изображения контролируемого объекта [7].

Приведем систему уравнений (9) к виду (1):

$$Y_{1}(\tau) = -\gamma_{1} \sigma \left\{ \sum_{k}^{\{x,y,z\}} \sum_{u=1}^{q} \xi_{1uk} v_{1uk} L_{uk} + \sum_{k}^{\{x,y,z\}} \sum_{j=1}^{p} \zeta_{1jk} \eta_{1jk} x_{jk}(\tau) \right\};$$

$$\dots$$

$$Y_{n}(\tau) = -\gamma_{n} \sigma \left\{ \sum_{k}^{\{x,y,z\}} \sum_{u=1}^{q} \xi_{nuk} v_{nuk} L_{uk} + \sum_{k}^{\{x,y,z\}} \sum_{j=1}^{p} \zeta_{njk} \eta_{njk} x_{jk}(\tau) \right\},$$

$$(10)$$

Условие (4) существования измерительновычислительных алгоритмов, получаемых из (10) и необходимых для вычисления искомых информативных компонентов  $x_{1k}(\tau),...,x_{pk}(\tau)$ , будет выглядеть следующим образом:

$$\det\left[\frac{\partial Y_i(\tau)}{\partial x_{jk}(\tau)}\right] \neq 0 \ i = \overline{1, n}, \ j = \overline{1, p}.$$
(11)

Решая систему уравнений (10) относительно  $x_{1k}(\tau),...,x_{pk}(\tau)$ , получаем измерительновычислительные алгоритмы в аналитическом виде:

$$x_{1k}(\tau) = f_1 \{Y_1(\tau), ..., Y_n(\tau)\};$$
....
$$x_{pk}(\tau) = f_p \{Y_1(\tau), ..., Y_n(\tau)\}.$$
(12)

В данных алгоритмах перед аналитическим выражением может появиться знак «–», наличие которого несет соответствующее информационное содержание, обусловленное принятыми ранее соглашениями (7) и (8). В частности, знак «–» перед значением компоненты  $x_{jk}(\tau)$ говорит о направлении вектора названной компоненты, противоположном направлению соответствующей координатной оси.

Представленные положения метода многомерных тестовых объектов являются базой построения оптических информационно-измерительных систем для определения составляющих сложных многокомпонентных перемещений подвижных объектов, позволяя в рамках метода решать некорректную задачу восстановления реальных координат движущегося объекта по его плоскому изображению. Примеры реализации метода представлены в работах [6, 7] и вследствие ограничений на объем здесь не приводятся.

Как видно из положений метода многомерных тестовых объектов, существенную роль для его реализации играют модели многокомпонентных перемещений, используемые в процессе записи систем уравнений (1), (5), (10) и других. Аппарат построения таких моделей, основанный на базовых положениях концепции векторной многокомпонентной физической величины [1-3], принципиально необходим для решения проблемы измерения. Еще одной оригинальной особенностью названных моделей является наличие в них математических объектов  $\mathbf{L}_{1k},...,\mathbf{L}_{qk}$ , отражающих использование нового физического объекта, получившего название тестового. Использование таких объектов в рассматриваемых моделях обусловлено необходимостью наращивания их информационной избыточности, переходящей в качество получаемой в процессе реализации метода измерительной информации. Однако вопросы генерирования многомерных тестовых объектов, их классификации, области существования, оптимизации количества их информационных составляющих, вопросы влияния их вида на качество и количество получаемой в процессе измерения информации до настоящего времени почти не поднимались. Поэтому следующие шаги в развитии данного научного направления целесообразно направить в сторону сформулированных вопросов.

В работе [6] отмечено, что в зависимости от размерности модели тестовый объект может быть одномерным или многомерным. Проводя аналогию между информативными параметрами (составляющими) многомерного тестового объекта и информативными составляющими сложных перемещений, составляющие многомерных тестов или их проекции на координатные оси можно рассматривать как многокомпонентные величины - многокомпонентные тесты, составляющие которых в моделях многокомпонентных перемещений также являются векторными величинами. Соответственно, общая методика формирования многокомпонентных тестов и функции связи их компонентов с моделируемыми величинами подпадают под основные положения концепции векторных многокомпонентных физических величин и могут быть сформулированы следующим образом:

 – многомерные многокомпонентные тесты рассматриваются как функции множества составляющих их информативных компонентов;

 функции связи названных компонентов в моделях многокомпонентных тестов определяются законами векторной алгебры;

 модели векторных многомерных многокомпонентных тестов допускают многовариантность представления указанных составляющих в зависимости от решаемой задачи.

Рассмотрим примеры формирования многокомпонентных тестов на основе одномерных и многомерных тестовых объектов.

На рис. 1 показан одномерный тестовый объект в виде отрезка АВ. Его можно рассматривать как одномерный однокомпонентный или как одномерный многокомпонентный.

В первом случае учитывается то, что отрезок АВ размещен вдоль оси  $O_0X_0$ , проецируется на плоскость  $O_0Y_0Z_0$  в точку и имеет один образцовый геометрический параметр – длину  $L_x$ . Во втором случае рассматриваются два образцовых параметра:

$$AO_i = n L_x; O_i B = (1 - n) L_x, n \in (0, 1).$$
 (13)

Соответственно, каждый из обозначенных параметров может участвовать в формировании моделей, входящих в систему уравнений (10).



Рис. 1. Одномерный тестовый объект

На рис. 2 показан многомерный (в данном случае – двухмерный) тестовый объект в виде крестообразной фигуры ABCD. Фигура расположена в плоскости O<sub>0</sub>X<sub>0</sub>Y<sub>0</sub>.

На ней обозначены следующие образцовые параметры (тесты), являющиеся информативными компонентами данного многомерного тестового объекта ABCD:

$$AB = L_{ABx}$$
 и  $CD = L_{CDy}$ ; (14)

AO<sub>i</sub> = 
$$nL_{ABx}$$
 и BO<sub>i</sub> =  $(1-n)L_{ABx}$ ,  $(n = 0,5)$ ; (15)

$$CO_{i} = nL_{CDy} \text{ M } DO_{i} = (1-n)L_{CDy}, (n = 0,5); (16)$$
$$EB = (1-n)L_{ABx} \text{ M } FD = (1-n)L_{CDy},$$
$$(n = 0,75).$$
(17)

В моделях (6), (9) и (10) весовые коэффициенты  $v_{iuk} \in [0,1]$  и  $v_{iux} \in [0,1]$ ,  $v_{iuy} \in [0,1]$ ,  $v_{iuz} \in [0,1]$  являются аналогами коэффициентов n и (1-n) в соотношениях (13)–(17). В соответствии с методикой формирования многокомпонентных тестов они определяют модуль соответствующей компоненты многомерного тестового объекта. Положительное направление вектора соответствующей компоненты многокомпонентного тестового объекта в формируемых моделях определяется в соответствии с соглашением (7).



Рис. 2. Многомерный тестовый объект

Формальный аппарат построения моделей многокомпонентных перемещений, основанный на использовании коэффициентов  $v_{iux} \in [0,1], v_{iuy} \in [0,1], v_{iuz} \in [0,1], \eta_{ijx} \in [0,1], \eta_{ijy} \in [0,1], \eta_{ijz} \in [0,1]$  и соглашений (7) и (8) для коэффициентов  $\xi_{iuk}$ ,  $\zeta_{iuk}$ ,  $\gamma_i$ , позволяет автоматически включить в процесс формирования моделей встраивание в них составляющих многокомпонентных многомерных тестов, что делает процедуру реализации метода измерения логически завершенной.

Приведенные на рис. 1 и 2 тестовые объекты, а также предложенные в качестве информативных компонентов их геометрические параметры не исчерпывают возможное множество форм и конфигураций тестовых объектов. Поэтому проблемы формирования многомерных тестов, их классификации, оптимизации количества и качества в моделях, о которых говорилось во второй части настоящей работы, еще предстоит рассмотреть. В этом смысле данная часть носит в значительной степени постановочный характер, определяя направление дальнейших исследований.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Нестеров, В. Н.* Принципы измерений векторных многокомпонентных физических величин / В. Н. Нестеров // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2003. – № 2–3. – С. 92–98.

2. Нестеров, В. Н. Теоретические основы измерений составляющих векторных многокомпонентных физических величин / В. Н. Нестеров // Труды III Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления». – М. : ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, 28–30 января 2004. – С. 1691–1700.

3. *Нестеров, В. Н.* Теоретические основы измерений составляющих векторных многокомпонентных физических величин / В. Н. Нестеров // Измерительная техника. – 2004. – № 7. – С. 12–16.

4. *Фу, К.* Робототехника : пер. с англ. / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли. – М. : Мир, 1989. – 624 с.

5. *Нестеров, В. Н.* Математические модели векторных многокомпонентных физических величин и метод многомерных тестов в оптических измерительных системах / В. Н. Нестеров, А. В. Мещанов // Измерительная техника. – 2006. – № 12. – С. 10–13.

6. *Нестеров, В. Н.* Метод многомерных тестовых объектов в оптических измерительных системах / В. Н. Нестеров, В. М. Мухин, А. В. Мещанов ; под ред. В. Н. Нестерова. – Самара : Изд-во Самарского научного центра РАН, 2013. – 224 с.

7. Способ измерения компонентов сложных перемещений объекта : пат. 2315948 Рос. Федерация, МПК G 01 В 11/00 / В. Н. Нестеров, А. В. Мещанов, В. М. Мухин ; заявители и патентообладатели В. Н. Нестеров, В. М. Мухин. – № 2006114270/28 ; заявл. 26.04.2006 ; опубл. 27.01.2008, Бюл. № 3. – 9 с.

УДК 680.5.01:621.384

## А. В. Полунин, М. И. Труфанов, В. С. Титов А. V. Polunin, М. I. Truphanov, V. S. Titov

# БИНОКУЛЯРНАЯ СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ С ВИДЕОДАТЧИКОМ С ИЗМЕНЯЕМЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА STEREO VISION SYSTEM WITH ZOOM LENS FOR MOBILE ROBOT

## Юго-Западный государственный университет South-West State University

### E-mail: alp77@mail.ru

Представлена видеосистема для пространственного восприятия рабочей сцены Новые функции видеосистемы – увеличение масштаба изображения объекта и автокалибровка видеодатчика, позволяют повысить точность измерений.

Ключевые слова: мобильный робот, транспортный, цех, оптико-электронный датчик, калибровка.

The vision system for stereo reconstruction of work scene is presents. New functions of vision system are zoom for object magnification and autocalibration the videosensor, this allow more precision measurements.

Keywords: mobile robot system, videosensor, image processing.

Задача реализации трехмерного зрения на мобильных подвижных системах является востребованной во многих областях, связанных с автоматизацией процессов транспортировки грузов и обнаружения объектов по априори заданному описанию (например, поиску и сбору трав-дикоросов). Традиционно данная задача решается либо посредством введения активной структурированной подсветки, что не всегда допустимо, либо с использованием бинокулярного восприятия за счет применения двух идентичных видеодатчиков, размещенных на некотором расстоянии.

Так, например, известен ряд оптико-электронных систем (как бинокулярных, так и монокулярных), решающих задачу автоматического восприятия рабочей сцены с целью измерения трехмерных координат рабочей сцены для их последующего распознавания, недостатком которых является относительно низкая точность вычисления параметров рабочей сцены, обусловленная использованием видеодатчиков с фиксированным фокусным расстоянием, что приводит к снижению точности на относительно больших расстояниях. Существуют также системы с единственным видеодатчиком с изменяемым фокусным расстоянием за счет оснащения трансфокатором, однако известные системы в таком случае исключают использование бинокулярного пассивного принципа трехмерного очувствления.

Предлагаемая система технического зрения отличается использованием бинокулярного принципа трехмерного восприятия при сохранении в одном из видеодатчиков функции изменения фокусного расстояния, что позволяет получать увеличенные изображения удаленных объектов. Для компенсации возникающих вследствие изменения фокусного расстояния, ориентации и последующего приведения к исходному состоянию параметров бинокулярной системы технического зрения введена функция автоматической калибровки.

Структурно-функциональная организация предлагаемой системы технического зрения

(СТЗ) представлена на рис. 1.

СТЗ состоит из следующих блоков – видеодатчика с постоянным фокусным расстоянием, видеодатчика с изменяемым фокусным расстоянием (при этом его минимальное фокусное расстояние равно фокусному расстоянию видеодатчика с постоянным фокусным расстоянием) и системой его ориентации в пространстве, вычислительным модулем на базе программируемой логической интегральной схемы, включающей вычислительные модули с 6 по 24 (рис. 1), вычислителя на базе сигнального процессора, коммуникационного контроллера.



Рис. 1. Структурно-функциональная организация системы технического зрения

СТЗ функционирует согласно алгоритму, представленному на рис. 2. СТЗ функционирует в двух режимах - основном и автоматической калибровки. В основном режиме СТЗ обеспечивает вычисление трехмерных координат объектов и передачу изображений и параметров объектов для распознавания (непосредственно распознавание СТЗ не реализует, однако реализует функцию идентификации ранее обнаруженных объектов). В режиме калибровки, выполняемом при неподвижном положении робота, на котором установлена СТЗ, осуществляеткоррекция возникающих со временем ся погрешностей пространственного положения и внутренних параметров видеодатчика с трансфокатором.

Рассмотрим более подробно процесс функционирования СТЗ в каждом из режимов. Общим у обоих режимов является процесс получения изображения: оптическое излучение, фокусируемое объективами 1 и 3 на приемники изображения 2 и 4 пиксель за пикселем считываются контроллерами ввода изображения [1, 2] и записываются через системную шину в ОЗУ. Модуль фильтрациии в режиме обработки скользящим окном уменьшает влияние случайных помех на изображении, в результате в ОЗУ формируются два кадра изображения с пониженным уровнем случайного шума и устраненной хроматической аберрацией и дисторсией. Дальнейшее функционирование СТЗ в основном режиме и режиме калибровки различается.

В основном режиме модуль сегментации осуществляет декомпозицию изображения на отдельные локальные сегменты [3].

Одновременно с этим модуль расчета характерных особенностей обнаруживает на разных кадрах, поступающих с фиксированного и подвижного видеодатчиков, характерные особенности, которые затем взаимно «привязываются» друг к другу модулем сопоставления особенностей. Совокупность параметров сегментов и параметров сопоставленных особенностей поступает в модуль формирования объ-



ектов, принимающий решение о принадлежности выделенных сегментов одному или разным объектам. В результате обработки данных модуль формирования объектов записывает в ОЗУ

Рис. 2. Алгоритм функционирования системы технического зрения

параметры объектов (параметры включают в себя набор дескрипторов, сегментов и двумерных координат на каждом кадре), которые считываются модулем расчета трехмерных координат объектов для определения пространственного положения характерных особенностей и границ объектов. Таким образом, после указанных действий в ОЗУ находится описание трехмерных объектов, найденных на рабочей сцене. В зависимости от конечной цели функционирования мобильного робота данные описания найденных трехмерных объектов могут быть переданы в модуль сопоставления объектов, позволяющий сопоставить текущий и найденный ранее объект, а также в модуль идентификации объектов для распознавания.

Процессом функционирования СТЗ и синхронизацией отдельных модулей управляет вычислитель на базе сигнального процессора. При необходимости получения увеличенного изображения объекта вычислитель подает команду на контроллер ориентации для изменения фокусного расстояния и изменения ориентации видеодатчика с трансфокатором, которая исполняется системой ориентации. После получения увеличенного изображения объекта параметры видеодатчика возвращаются в исходное состояние.

Для устранения погрешностей, возникающих вследствие изменения фокусного расстояния и ориентации видеодатчика введен режим калибровки.

В режиме калибровки согласно методу [4] производится приведение бинокулярной системы из двух видеодатчиков в такое состояние, при котором их главные оптические оси взаимнопараллельны, а фокусные расстояния равны. Калибровка осуществляется только при неподвижном положении робота по неподвижному объекту. Для принятия решения о наличии или отсутствии движения изображение рабочей сцены передается на модуль обнаружения движения. Выбор калибровочного объекта осуществляется в его модуле выбора. Критериями выбора объектов являются: неподвижность объекта, достаточная удаленность, наличие четко выраженных характерных особенностей (граней, углов, точек). На основе анализа изображения калибровочного объекта при различной ориентации подвижного видеодатчика модуль расчета калибровочных параметров вычисляет параметры положения и приводит их и фокусное расстояние к заданным значениям (более подробно алгоритм калибровки представлен в [4]).

Модуль уточнения собственных координат предназначен для вычисления собственного положения СТЗ относительной мировой системы координат с центром в заранее выбранной условной точке. Коммуникационный контроллер обеспечивает прием команд для мобильного робота и передачу данных об объектах.

Экспериментальные исследования созданной системы осуществлялись по реальным и синтезированным изображениям.

Для проведения исследований по реальным изображениям был собран макет, в котором в качестве видеодатчиков использовались видеокамеры Trendnet IP422 (с фиксированным фокусным расстоянием) и IP612 (с переменным фокусным расстоянием и системой ориентации), размещенные на расстоянии 12 см друг от друга и подключенные к ноутбуку с программным обеспечением, реализующим алгоритм на рис. 2. Методика исследований заключались в следующем: на полу помещения были размещены кубики, с нанесенными на их грани различными рисунками, макет системы был неподвижен относительно кубиков и обеспечивал распознавание посредством сравнения с эталонами рисунков на кубиках и вычислял их трехмерные координаты.

Для исследований по синтезированным изображениям было создано имитационное программное обеспечение с использованием библиотеки трехмерной графики OpenGL, обеспечивающее моделирование движения СТЗ в помещении склада с установленным контейнерами. Методика исследований с использованием синтезированных изображений заключалась в имитации движения СТЗ, измерении трехмерных координат контейнеров и распознавании контейнеров с учетом движения робота.

Декомпозирование общей задачи по обнаружению и идентификации объектов на отдельные небольшие и, что важно, обособленные, подзадачи позволило реализовать каждый модуль СТЗ в виде функционально завершенного вычислительного элемента, реализуемого в программируемой логической интегральной схеме; это обеспечило, во-первых, портативность и автономность устройства, а, во-вторых, параллельность выполнения отдельных подзадач и обработку изображений в реальном времени. В результате экспериментальных исследований установлено: разработанный алгоритм может быть использован для вычисления трехмерных координат объектов при движении мобильного робота; использование видеодатчика с изменяемым фокусным расстоянием позволяет увеличить точность измерения трехмерных координат в 2,8–5,1 раз (в зависимости от фокусного расстояния видеодатчика) и вероятность правильного распознавания вследствие увеличения детализации изображений, и при этом автоматическая калибровка позволяет привести систему из видеодатчиков в исходное состояние, обеспечивающее корректное трехмерное восприятие.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙСПИСОК

1. Пат. № 2351983РФ, МКИ G06К9/32. Устройство ввода изображения в ЭВМ и коррекции дисторсии / Д. В. Титов, М. И. Труфанов. – № 2007140622 заявл. 1.11.2007; опубл. 10.04.09, Бюл. № 10. – 8 с.

2. Пат. № 2352987РФ, МКИ G06К9/20. Устройство получения изображения с коррекцией хроматической аберрации / А. С. Козлов, В. С. Титов, М. И. Труфанов. – № 2007113026 заявл. 3.09.2007 ; опубл. 20.04.09, Бюл. № 11. – 9 с.

3. Пат. № 2365998, МПК G06Т9/00. Способ формирования панорамных изображений / Е. И. Бугаенко, М. И. Труфанов, П. А. Сорокин. – № 2006144943 заявл. 18.12.2006; опубл. 27.08.09, Бюл. № 24. – 14 с.

4. *Titov, V.* The calibration method for stereoscopic vision system [text] / V. Titov, S. Degtiarev, M. Truphanov // Machine graphics and vision. Poland, Vol. 17, No. 4, 2008. – PP. 373–387.

УДК 658.562

## Ю. П. Муха, В. А. Секачёв Y. P. Mucha, V. A. Sekashev

# АЛГОРИТМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ НАЛОЖЕНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ ГРАФОВ

# ALGORITHM FOR DEFINITION OF POSSIBILITY OF IMPOSING OF THE DIRECTED COUNTS

### Волгоградский государственный технический университет Volgograd State Technical University

### E-mail: vt@vstu.ru, viktor-sv@vstu.ru

Предложен алгоритм для поиска вариантов наложения структур направленных графов. Данный алгоритм может быть применен для проверки вновь создаваемых структур подсистем ИИС на присутствие фрагментов в уже существующих. Возможно применение его и при восстановлении структуры на множестве наименьшей внешней устойчивости для исключения повторяющихся вариантов структур.

*Ключевые слова*: направленный граф, структура, диаграмма соответствия, дерево вариантов наложения, список смежности.

The algorithm for search of options of imposing of structures of the directed counts is offered. This algorithm can be applied to check of again created structures of subsystems of IIS on presence of fragments at the already existing. Its application is possible and at structure restoration on a set of the smallest external stability for an exception of repeating options of structures.

Keywords: the directed count, structure, the compliance chart, tree of options of imposing, contiguity list.

В настоящее время для ускорения проектирования сложных технических объектов, к которым относятся ИИС [2], вводится понятие преемственности фрагмента уже спроектированных и работающих объектов. Для контроля компонентной совместимости, когда необходимо установить, содержит ли спроектированная структурная схема сложной ИИС типовые компоненты, применяется операция вхождения категорий, то есть имеется задача о возможности наложения фрагмента А направленного графа на граф С спроектированной или проектируемой подсистемы. Может встать задача определения возможного количества наложений, которое бы точно выделяло нужный компонент.

Математический аппарат для теории графов представлен в [1, 3].

Математическое описание этой задачи сводится к постановке вопроса: наложится ли направленный граф  $A(V_n, S_k)$ , где  $V_n$  – множество вершин (компонент ИИС, мощностью n;  $S_k$  – множество связей между компонентами, мощностью k) на граф проектируемой подсистемы C ( $V_a$ ,  $S_b$ ), причем выполняется условие  $a \ge n$ ,  $a \ b \ge k$ . В случае a = n,  $a \ b = k$  задача сводится к определению идентичности компонента подсистемы C.

Для реализации алгоритма, выполняющего эту обработку, есть несколько вариантов решений, обладающих как достоинствами, так и недостатками. Рассмотрим их подробнее:

1) сокращение количества вершин. В структуре С случайным образом удаляется несколько вершин. После этого сравнивается список смежности структур С и А. Список смежности направленного графа отображает связи, идущие от данной вершины к другим вершинам. В нашем случае имеется дифференциация входящие вершины, символ-разделитель, исходящие вершины. Две структуры будут одинаковыми по связности, если количество маскированных элементов определенного типа, входящих в списки смежности обеих структур, будет одинаковым. Реализованный по данному сценарию алгоритм не будет работать в случае, если количество вершин будет одинаковым, а количество связей – различным. Например, структура F содержится в структуре Z, но выяснить это, удаляя определенные вершины из списка, генерируемые произвольным путем, не удастся, поскольку количество вершин одинаково;



Рис. 1. Направленный граф С содержится в направленном графе V (три варианта наложения)

2) гораздо лучше применить в этом случае сокращение количества связей. Для этого составляется список связей: 'исх. вершина','>','вх. вершина'. При помощи алгоритма, генерации случайных чисел из списка выбирается та или иная связь, которая будет удалена из структуры.

Главный недостаток этих двух способов – наличие большого числа итераций. Кроме того, возможны варианты, когда при неудачной генерации номеров вершин цикл может выполняться впустую.

Возможен и способ, описанный в [6], где говорится о матричном методе разбиения исходных графов. Этот метод отличается сложностью.

Для исключения случайной выборки можно применить последовательный перебор элементов. Последовательный перебор может быть осуществлен как по вершинам, так и по ребрам. Для сокращения вариантов перебора строится матрица совпадений, имена строк в которой соответствуют именам компонентов накладываемой структуры, а имена столбцов - именам компонентов структуры наложения, пересечение строки и столбца – возможно ли наложение или нет. В случае ребра берется совпадение путем наложения маскированного списка смежности вершины исхода и вершины входа. Также второй подход более эффективен, так как позволяет исследовать структуры с одинаковым количеством вершин и разным количеством связей между вершинами. Этот способ хорош только для структур с небольшим количеством связей (до 14) и вершин (до 8). В иных случаях процесс поиска может затянуться на многие часы.

Варианты поиска с предположением. Суть сводится к тому, что в малой структуре выбирается вершина, которая отождествляется с аналогичной вершиной (по маскированному списку смежности) большой структуры. Далее следует попытка сопоставить остальные вершины и выбрать единственный вариант, когда вершины совпадают и получаемая структура совпадает с исходной.

Ниже даются пояснения, что такое матрица совпадений, список смежности, маскированный список смежности.

Пусть имеются структуры V и C (см. рис. 2). Списком смежности для вершины v4 будет v2, v5, -, v3, v7, где v2, v5 – вершины входа, '-'- символ-разделитель, v3, v7 - вершины выхода. Аналогично, для структуры С для вершины с2 будет с8, с10, -, с4. Маскированный список смежности для вершины v4 структуры V будет \*\*-\*\*. Суть его получения состоит в том, что имя смежных вершин заменяется символом маски, в данном случае это '\*', символ разделитель остается прежним. Если маскированный список смежности определенной вершины содержится в другом списке смежности или совпадает с ним, как например, список вершин v4 и c2 (действительно, "\*\*-\*\*" и "\*\*-\*" - совпадают, поскольку строка "\*\*-\*" входит в строку "\*\*-\*\*", начиная с первой позиции). Аналогично, маскированный список смежности вершин v7 и c2 (\*-\* и \*\*-\* соответственно) не совпадает, поскольку список вершины с2 длиннее.



Рис. 2. Графы для иллюстрации работы одного из вариантов алгоритма наложения

Матрицей совпадений будет таблица, в которой отображается смежность вершин или связей для обоих графов структур. Например, для наших структур она будет иметь вид:

	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	v10	v11	v12	
c2	+	-	+	+	+	-	-	+	-	+	-	6
c4	+	-	+	+	+	-	-	+	-	+	-	6
c5	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	2
c7	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	-	8
c8	-	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	7
c9	+	-	+	+	+	-	-	+	-	+	-	6
c11	-	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	3
c12	-	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	7

Видно, что вершине c2 структуры С могут соответствовать вершины v2, v4, v5, v6, v9, v11, а вершине c7 – вершины v2, v3, v4, v5, v6, v7, v9, v11. Можно сформировать варианты вершин новой структуры c2-v2, c4-v4, c5-v5, c7-v6, c8-v8, c9-v9, c11-v11, c12-v12. Число таких вариантов с повторениями равно произведению количества вариантов для одной вершины искомой структуры. Например, для вершины c2 таких вариантов – 6. Общее же число равно 6\*6\*2\*8\*7\*6\*3\*7 = 508032. Из отобранных вершин формируется новая структура путем удаления из старой структуры лишних вершин.

Очевидно, что данный алгоритм имеет недостаток – чем больше вершин в анализируемых графах, тем дольше время работы алгоритма, когда приходится проверять миллионы вариантов. Среди этих вариантов найдется несколько вариантов наложений и, соответственно, несколько вариантов соответствия вершин структуры V вершинам структуры С.

Если взять во внимание второй способ реализации данного алгоритма, а именно, когда определенная вершина структуры С накладывается поочередно на каждую вершину структуры V, получается единственный результат наложения. Время работы алгоритма в этом случае должно уменьшиться.

Пусть задана структура, представленная в виде направленного графа  $C(c_1, d_1)$ , и структура  $V(v_1, d_2)$ , причем количество вершин в структуре V меньше или равно количеству вершин в структуре C. Является ли структура V вхождением в структуру C, определяется следующим условием: 1) если возможно, взяв за опорную вершину с именем  $C_1$  структуры C с  $n_1$  входами и  $m_1$  выходами, наложить вначале вершину с именем  $V_1$  структуры V с  $n_2$  входами и  $m_2$  выходами, причем должно соблюдаться условие:  $n_2 \leq n_1$  и  $m_2 \leq m_1$  для первой вершины, наложить и все смежные исходящие и входящие вершины графа V с тем же условием;

2) если количество вершин и связей структур С и V одинаково, и выполняется первое условие, то направленные структуры С и V следует считать совпадающими; 3) если хотя бы одна вершина не удовлетворяет условию, то следует выбрать другую вершину.

Сократить варианты можно, используя древовидную диаграмму соответствия, на основе которой построен нижеописанный алгоритм.

Пусть даны две структуры. Для определения, является ли структура С совпадающей со структурой V, необходимо установить соответствие имени вершин структуры V с именем структуры С. Для этого применяется концепция наложения.



Рис. 3. Структуры для разборки работы алгоритма

Пусть  $V_1 \sim C_{10}$ . Так как у  $C_{10}$  – две исходящие связи и нет входящих связей, а у  $V_1$  – одна исходящая связь и две входящие, то не выполняется условие наложения (когда количество исходящих или входящих связей у накладываемой вершины больше, чем у вершины графа, на которую осуществляется наложение).

Пусть  $V_2 \sim C_1$ . Тогда представление структуры V можно переписать в виде списка смежности:

Построение списка смежности ведется до тех пор, пока все известные связи между вершинами исходной структуры не будут перечислены. Если при перечислении попадает уже известная связь, она игнорируется.

Если перерисовать список смежности в виде диаграммы соответствия, получим:



Здесь точками изображены уже существующие связи.

Аналогично для С1:

 $\begin{array}{c} C_1 \\ C_7 C_{10} - C_2 \\ C_8 C_9 - C_1, \ [] - C_1 C_9, \ C_1 - \ C_3 \ C_4 \ C_6 \\ C_6 \ C_9 - \ C_5 \ C_7, \ C_{10} - C_7 \ C_8, \ C_7 C_{10} - C_2, \ C_{10} - C_7 \ C_8, \ C_7 C_{10} - C_2, \ C_2 - C_4, \ C_2 C_3 \ C_5 - C_6, \ C_2 C_4 - C_8 \end{array}$ 

Диаграмма соответствия будет иметь вид:



Таким образом, для представления структуры выбрана трехуровневая диаграмма соответствия. Если сравнивать второй уровень  $(V_1-V_3)$ структуры V и второй уровень структуры C  $(C_7C_{10}-C_2)$ , то при маскированном сравнении можно получить, что  $V_3 \sim V_2$ , а  $V_1 \sim V_7$  или  $V_1 \sim V_{10}$ . Далее, при нисходящем поиске соответствия, если попадаются неоднозначные ва-

 $C_1$ V рианты, то производится проверка по каждому с возвратом на вышестоящий уровень. На каждый вариант строится своя диаграмма соответствия в процессе работы алгоритма по эталонной структуре.

Дерево вариантов наложения при наложении вершины  $V_2$  структуры V на вершину  $C_1$  структуры будет иметь вид:

$$\begin{array}{c} V_{2} \\ C_{7}C_{10} - C_{2} \\ V_{1} - V_{3} \\ [2-1] \\ C_{8}C_{9} - C_{1}, -C_{1}C_{9}, C_{1} - C_{3} C_{4} C_{6} \\ V_{4}V_{5} - V_{2}, V_{2} - V_{4} \\ [4-1], [], [1-3] \\ C_{6} C_{9} - C_{5} C_{7}, C_{10} - C_{7} C_{8}, C_{7}C_{10} - C_{2}, C_{2} - C_{4}, C_{2}C_{3} C_{5} - C_{6}, C_{2}C_{4} - C_{8} \\ V_{3}V_{5}V_{6} - V_{1}, -V_{1}V_{4}V_{6}, V_{1} - V_{3}, V_{3}V_{5}V_{6} - V_{1} \\ [], [], [], [], [2-1], [] \end{array}$$

Количество вариантов наложения рассчитывается как произведение количества связей исходящих/входящих вершин структуры наложения на соответствующее количество исходящих/входящих вершин накладываемой структуры.

Представление данных в памяти ЭВМ описано в [4, 5] на основе матрицы инцидентности в виде динамического массива записей: stroka = record

Nam : string; { Имя вершины графа до 200 символов} dirtext : string[2]; {Положение текста имени вершины на рисунке графа (2 символа) } X : integer; {X координата положения вершины графа на рисунке} Y : integer; {Y координата положения вершины графа на рисунке} fun : string[250]; {строка функции в вершине графа до 200 символов} sv : array of ShortInt; { динамический массив исходов и входов связей графа }

end:

type strukt = array of stroka; {Собственно структура графа, динамический массив типа stroka}

Представление графа на диске в виде текстового файла аналогично вышеописанной записи и имеет вид:

<Имя вершины><пробел><положение текста названия вершины><пробел><Хкоордината><пробел><Y-

координата><пробел><блочная функция><пробел><сведения о связях (-1 – исход связи, 1 – вход связи, 0 - заполнитель)>.

При перемене варианта в вышестоящей структурной диаграмме будет меняться весь нижестоящий фрагмент структуры. Алгоритм будет выглядеть следующим образом:

 выбирается вершина графа, на который будет осуществляться наложение;

 поочередно просматриваются все вершины накладываемой структуры;

3) если условие наложения выполняется, то

 выполнить преобразование накладываемой структуры к древовидной форме, используя за корневую накладываемую вершину;

3.2) выполнить преобразование структуры, на которую осуществляется наложение, используя за корневую вершину, на которую осуществляется наложение;

 3.3) сформировать для вершин древовидной структуры эталонное дерево вариантов наложения;

3.4) сформировать единичное дерево вариантов наложения (все элементы должны быть равны 1);

4) увеличиваем на 1 единичное дерево вари-

антов в соответствии с эталонным вариантом;

5) формируем список соответствий между вершинами наложения и налагаемой структур;

6) удаляем вершины, не вошедшие в список, из вершины наложения;

7) сравниваем структуру наложения с налагаемой структурой;

8) если совпадает – помещаем список соответствий в массив итоговых результатов, если нет – выполняем пп. 4–7 до тех пор, пока изначально единичная матрица вариантов не совпадет с матрицей максимальных вариантов.

Время обработки исходных графов с большим количеством вершин и ребер может быть довольно продолжительным. Скорость работы данного алгоритма при большом количестве вершин и ребер в исходных структурах может замедляться. Для сокращения времени обработки можно применить вариант алгоритма, в котором вариант перебора осуществляется по каждой строке. Выбор производится до тех пор, пока в предполагаемом варианте не окажется ни одного повтора. После этого производится подсчет связей в структуре, построенной на очередном варианте вершин. Если количество выше того, что было до этого, то последнее количество запоминается, если меньше - восстанавливается последний наиболее удачный вариант. Такой перебор осуществляется по каждой строке двумерного динамического массива вариантов в одном повторе. Количество повторов будет равно максимальной длине строки динамического массива возможных вариантов.

# Краткая программная реализация алгоритма на Object Pascal

// Выбираем вершину накладываемого графа (Ak) и графа наложения (An) и помещаем в двумерный динамический массив (rz\_pr).

SetLength(rz\_pr, 1); SetLength(rz\_pr[0], 1); rz\_pr[0, 0]:=Ak+'-'+An;

// Пока количество строк в rz\_pr меньше, чем количество вершин в графе Sk while length(rz\_pr)<length(Sk) do

begin

k1:=1; k2:=length(rz\_pr); k3:=k1+k2;

```
// Запоминаем текущее количество строк
 lp:=length(rz_pr);
 for i:=k1 to k2 do
 for j:=1 to length(rz pr[i-1]) do
  begin
// Определяем список входящих и исходящих вершин для графа наложения (Sn)
   m1:=xxxx(Sn, divstring(rz pr[i-1, j-1], '-')[1]);
  // Определяем список входящих и исходящих вершин для накладываемого
   // графа (Sk)
   m2:=xxxx(Sk, divstring(rz pr[i-1, j-1], '-')[0]);
   // Определяем массив вариантов соответствий (lm1)
   lm1:=Sootv2 io(m1, m2);
   // Если (lm1) содержит в себе элементы, добавляем те, которых еще нет в строке
   // (rz pr)
  if length(lm1)>0 then Add2Arr(rz pr, lm1);
  end;
 // Если новые элементы добавить нельзя, выходим из цикла while
 if length(rz_pr)=lp then break;
 k1:=k3; k2:=length(rz pr); k3:=k1+k2;
end;
// Если в (rz pr) вошли не все имена вершин из накладываемого графа, то обнуляем
// (rz pr), иначе производим отбор по принципу: одна вершина графа наложения -
// несколько вершин накладываемого графа
if Count Arr2(rz pr)<length(Sk) then SetLength(rz pr, 0) else
begin
 SetLength(rzp, 1);
 SetLength(rzp[0], 1);
 rzp[0, 0]:=rz pr[0, 0];
 for i:=2 to length(rz pr) do
 for j:=1 to length(rz pr[i-1]) do
  begin
   _pos2_vv(rzp, rz_pr[i-1, j-1], 11, 12);
   if (11=0) and (12=0) then
   begin
    11:=length(rzp)+1;
    SetLength(rzp, 11);
    SetLength(rzp[11-1], 1);
    rzp[11-1, 0]:=rz_pr[i-1, j-1];
   end;
   if (11>0) and (12>0) then
   begin
    SetLength(rzp[11-1], length(rzp[11-1])+1);
   rzp[11-1, length(rzp[11-1])-1]:=rz pr[i-1, j-1];
   end;
  end;
 end;
```

// Если количество строк в промежуточном массиве (rzp) меньше количества // элементов в накладываемом массиве (Sk). То обнуляем (rzp) if length(rzp)<length(Sk) then SetLength(rzp, 0);</p>

SetLength(rz\_pr, 0); rz\_pr:=rzp; SetLength(rzp, 0);

// Оставляем для первой строки лишь один заданный вариант соответствий if length( $rz_pr$ )>0 then SetLength( $rz_pr$ [0], 1);

// Производим удаление ненакладываемых вершин for i:=2 to length(rz pr) do

```
for j:=1 to length(rz pr[i-1]) do
 begin
  m1:=xxxx(Sn, divstring(rz_pr[i-1, j-1], '-')[1]);
  m2:=xxxx(Sk, divstring(rz pr[i-1, j-1], '-')[0]);
  lm1:=Sootv2 io(m1, m2);
  if length(lm1)=0 then rz pr[i-1, j-1]:='---';
  if pos(divstring(rz pr[0, 0], '-')[1], rz_pr[i-1, j-1])>0 then
  rz pr[i-1, j-1]:='---';
 end;
SetLength(rzp, length(rz pr));
for i:=1 to length(rz pr) do
 for j:=1 to length(rz_pr[i-1]) do
 if rz_pr[i-1, j-1] >'---' then
  begin
  SetLength(rzp[i-1], length(rzp[i-1])+1);
  rzp[i-1, length(rzp[i-1])-1]:=rz pr[i-1, j-1];
  end;
// Удаляем пустые строки
SetLength(rz_pr, 0);
for i:=1 to length(rzp) do
 if length(rzp[i-1])>0 then
 begin
  SetLength(rz pr, length(rz pr)+1);
  rz pr[length(rz pr)-1]:=rzp[i-1];
 end;
SetLength(rzp, 0);
rzp:=rz pr;
// Сортируем двумерный динамический массив по возрастанию количества
// элементов в каждой строке
SRT AF(rzp);
SetLength(htk0, 0); SetLength(htk, 0); SetLength(rz, 0);
// Формируем первоначальный вариант соответствия по вершинам, просматривая
// поочередно все элементы массива (rzp)
if length(rzp)>0 then
 begin
 for i:=1 to length(rzp) do
  begin
  if (length(rzp[i-1])=1) and (_pos_vv(rz, rzp[i-1, 0], 1)>0) then break;
   for j:=1 to length(rzp[i-1]) do
   // Если элемент соответствия отсутствует в (rz), то добавляем в (rz), а также
   // формируем массивы соответствий текущей позиции (htk) и общего
   // количества элементов в данной строке (htk0)
   if pos vv(rz, rzp[i-1, j-1], 1)=0 then
    begin
    SetLength(rz, length(rz)+1);
    rz[length(rz)-1]:=rzp[i-1, j-1];
    SetLength(htk0, length(htk0)+1);
    htk0[length(htk0)-1]:=length(rzp[i-1]);
    SetLength(htk, length(htk)+1);
    htk[length(htk)-1]:=j;
    break;
    end;
  end:
 // Если длина списка не соответствует числу вершин в накладываемой структуре
 // производится обнуление его длины и выход из программы
```

if length(rz)<length(Sk) then begin SetLength(rz, 0); New NN:=rz; exit; end; nw:=false: k1:=1: // Собственно, производится сам поиск, пока количество итераций меньше // количества элементов в самой большой строке текста while k1<length(rzp[length(rzp)-1]) do begin // Если найдено правильное наложение, по установленному флагу nw прервать // внешний цикл if nw then break; // Если количество связей, построенное на вершинах структуры (Sn), // соответствующих вершинам структуры (Sk) меньше, чем количество связей в // (Sk) if k st3(rz, Sn, Sk)<length(Sk[0].sv) then begin // Определяем количество связей, построенное на вершинах структуры (Sn), // соответствующих вершинам структуры (Sk), и запоминаем результат в (ci) ci:=k st3(rz, Sn, Sk); // обнуляем счетчик вершин (i) i:=0; while i<length(rzp) do begin // Увеличиваем (і) на 1 inc(i): // Запоминаем положение элемента соответствия в строке a:=htk[i-1];// Увеличиваем на 1 индекс положения элемента соответствия inc(htk[i-1]); // Если он выходит за пределы, приравниваем к 1 if htk[i-1]>htk0[i-1] then htk[i-1]:=1; // Если элемент соответствия отсутствует в (rz), то замещаем в (rz) на i-той // строке while pos vv(rz, rzp[i-1, htk[i-1]-1], 1)>0 do begin // Увеличиваем на 1 индекс положения элемента соответствия inc(htk[i-1]); // Если он выходит за пределы, приравниваем к 1 if htk[i-1]>htk0[i-1] then htk[i-1]:=1; end; // Заменяем і-й элемент в массиве соответствия (rz) rz[i-1]:=rzp[i-1, htk[i-1]-1]; // Если количество связей, построенное на вершинах структуры (Sn), // соответствующих вершинам структуры (Sk), равно количеству связей // в (Sk), то прерываем внутренний цикл по счетчику і и устанавливаем (nw) // для последующего прерывания внешнего цикла if k\_st3(rz, Sn, Sk)=length(Sk[0].sv) then begin nw:=true; break; end;

// Если количество связей в результате предыдущих шагов уменьшилось, то

```
// возвращаем индекс в (htk), запомненный в (a)
     if k st3(rz, Sn, Sk)<ci then
     begin
      htk[i-1]:=a;
      rz[i-1]:=rzp[i-1, a-1];
     end:
     // Если количество связей в результате предыдущих шагов увеличилось, но
     // количество связей, построенное на вершинах структуры (Sn),
     // соответствующих вершинам структуры (Sk) не равно количеству связей
     // в (Sk), то запоминаем новый результат в (ci)
     if (k_st3(rz, Sn, Sk)>ci) and
      (k_st3(rz, Sn, Sk)<length(Sk[0].sv)) then ci:=k_st3(rz, Sn, Sk);
    end:
   end;
  // Увеличиваем количество итераций на 1
  inc(k1);
  // Отображаем изменение индексных массивов (htk) и (htk0)
  Look Str(htk, Form1.Laq);
  Look Str(htk0, Form1.La);
  end;
 end;
 // Если количество связей, построенное на вершинах структуры (Sn),
 // соответствующих вершинам структуры (Sk) меньше, чем количество связей в
 // (Sk), обнуляем результирующий массив соответствий
 if k st3(rz, Sn, Sk)<length(Sk[0].sv) then SetLength(rz, 0);
 // Запоминаем полученный результат для дальнейшей обработки
New_NN:=rz;
end;
```

Этот алгоритм работает гораздо быстрее того, который предполагает перебор вариантов «через один», поскольку он не допускает двойного наложения вершин и выполняет проверку после выбора каждого варианта для каждой вершины.

Для проверки работы возьмем произвольный направленный граф, сгенерированный случайным образом в программном модуле [5]. Пусть исходный граф V, на который будет наложен граф C, содержит 30 вершин и 43 связи. Пусть граф F содержит 12 вершин и 25 связей (для примера). Проверка всех вариантов алгоритма с исключением уже заданных вершин в этом случае занимает примерно 5,75 с. Работа данного алгоритма представлена на рис. 4:



Рис. 4. Рабочее окно программной реализации разработанного алгоритма

## Вывод

Возможно несколько вариантов реализации данного алгоритма. Рассмотренный вариант учитывает саму структуру и имена вершин (функциональных блоков), при этом не учитывая их функциональные характеристики и параметры. Последние зависят от требуемой функциональности проектируемого объекта, и их значение может варьироваться в довольно широких пределах.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касьянов, В. Н. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение / В. А. Евстигнеев, В. Н. Касьянов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 1104 с.

2. Математические методы информатики в задачах и примерах : Опыт применения в проектировании сложных

систем : учеб. пособие / О. А. Авдеюк, С. В. Горбачев, Ю. П. Муха, В. А. Секачев, В. И. Сырямкин, В. С. Титов, Т. А. Ширабакина; Национальный исследовательский Томский гос. ун-т. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 2012. – 483 с.

3. *Новиков,* Ф. А. Дискретная математика для программистов / Ф. А. Новиков. – СПб.: Питер, 2001. – 304 с.

4. Секачёв, В. А. Специализированный программный пакет для автоматизации проектирования измерительных систем / В. А. Секачёв // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2003. – № 6. – С. 59–61.

5. Функциональный оптимизатор структур измерительных систем : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. ВНТИЦ № 2007613295 Российская Федерация / Ю. П. Муха, В. А. Секачёв ; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 03.08.2007

6. Волченская, Т. В. Компьютерная математика. Ч. 2. Теория графов / Т. В. Волченская, В. С. Князьков. – Пенза : Изд-во Пенз. ун-та, 2002. – 101 с.

# Е Часть З 📃

# РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 537.876+621.39

# V. P. Zayarniy, S. A. Parpula, V. S. Girich ДИСКОВАЯ АНТЕННА КРУГОВОГО ОБЗОРА НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНО РАСШИРЯЮЩИХСЯ ЩЕЛЕВЫХ ЛИНИЙ DISK ALL-ROUND LOOKING ANTENNA BASED ON LINEAR EXPANDING SLOT LINES

В. П. Заярный, С. А. Парпула, В. С. Гирич

## Волгоградский государственный технический университет Volgograd State Technical University

E-mail: zvp2000@mail.ru, parpula@yandex.ru, vlad\_net77@mail.ru

Экспериментально измерены диаграммы направленности линейно расширяющихся симметричных щелевых линий, расположенных соосно-симметрично на дисках. Исследовалась возможность их электродинамической совместимости в составе соосно расположенных дисковых антенных решеток.

*Ключевые слова*: диаграмма направленности, антенна, антенная решетка, главный лепесток, боковые лепестки.

Experimentally measured directional patterns is linearly symmetrical expandable slotted line, symmetrically arranged coaxially on the discs. Investigated the possibility of electrodynamics compatibility comprising coaxially arranged circular antenna arrays.

Keywords: radiation pattern, antenna, array, the main lobe, side lobes.

Разработка и исследование электродинамических характеристик антенных систем, в том числе СВЧ-диапазона для обеспечения кругового (или секторного) обзора приемопередающей аппаратуры является важным и актуальным, поскольку подобные системы востребованы в радио-, видеолокации; охранных системах и т. д. Решение задачи обеспечения секторного (кругового) обзора может быть достигнуто, в частности, проектированием дисковых конструкций с применением излучающих элементов в виде линейно расширяющихся симметричных щелевых линий (СЩЛ). Свойства подобных СЩЛ изучались и анализировались в [1–5].

В данной работе экспериментально исследовались плоские антенны осевого излучения, выполненные в виде симметричных щелевых линий с линейно расширяющимся раскрывом, вырезанных в дисковых металлических пластинах (медь, алюминий), толщиной ~0,3 мм, без диэлектрической подложки. Эти антенны разрабатываются для использования в качестве излучающих элементов в составе дисковых антенных решетках кругового (или секторного) обзора. Питание всех излучающих антенн производилось через коаксиальный разъем, микрополосковую линию передачи и симметричную щелевую линию, аналогично питанию антенн, описанных в [1].

## 1. Экспериментальное исследование плоских антенн СВЧ-диапазона с линейно-расширяющимся раскрывом при изменении их геометрических параметров

Для проведения натурного эксперимента был изготовлен набор антенн, у которых так же, как и при моделировании [3], ширина раскрыва *H* изменялась в пределах 1–3 $\lambda$ , при *L* = = 150 мм (т. е. 5 $\lambda$ ) для всех исследовавшихся антенн. При этом угол раскрыва антенны имел значения 10,5° (для *H* = 1 $\lambda$ ); 22,5° (для *H* = 2 $\lambda$ ) и 33,5° (для *H* = 3 $\lambda$ ).

Проектирование антенн производилось с учетом их электродинамических свойств и основных положений, изложенных в [2, 5]. Измерение их диаграмм направленности производилось на установке, описанной в [4, 6, 7].

На рис. 1–3 представлены диаграммы направленности исследовавшихся антенн в Е-, Н-плоскостях с шириной раскрыва H=30 мм (1 $\lambda$ ), 60 мм (2 $\lambda$ ) и 90 мм (3 $\lambda$ ), соответственно. Длина антенны во всех случаях была одинаковой (L = 150 мм). Анализ приведенных экспериментально измеренных ДН (рис. 1–3) показал, что при увеличении раскрыва антенны H их главный лепесток в E-плоскости, как и в случае расчетных ДН, сужается. При этом ширина экспериментально полученных ДН по половинной мощности составляла ~48° – в случае H = 30 мм (1 $\lambda$ ); ~32° – в случае H = 60 мм (2 $\lambda$ ) и ~20° – в случае H = 90 мм (3 $\lambda$ ), что хорошо согласуется с результатами приведенных выше теоретических исследований. Уровень боковых лепестков у экспериментально измеренных ДН был несколько выше, чем у расчетных и не превышал 0,3 от мощности в направлении излучения (для  $\theta = 0$ ). Из этих же рисунков видно, что в *H*-плоскости их ДН имеют ту же закономерность сужения главных лепестков, что и в *E*-плоскости. Однако в *H*-плоскости главные лепестки ДН несколько шире, чем в *E*-плоскости (для одних и тех же значений раскрыва антенн), и имели значения ~58° – в случае H == 30 мм (1 $\lambda$ ); ~54° – в случае H = 60 мм (2 $\lambda$ ) и ~38° – в случае H = 90 мм (3 $\lambda$ ). При этом имеет место тенденция к увеличению УБЛ при увеличении раскрыва антенны, также, как в случае расчетных ДН.



Рис. 1. Экспериментально измеренная диаграмма направленности антенны для случая L = 150 мм, H = 30 мм



Рис. 2. Экспериментально измеренная диаграмма направленности антенны для случая L = 150 мм, H = 60 мм



Рис. 3. Экспериментально измеренная диаграмма направленности антенны для случая L = 150 мм, H = 90 мм

Из полученных расчетных и экспериментальных результатов видно, что имеется явная зависимость ширины главного лепестка ДН исследовавшихся плоских симметричных антенн с линейно изменяющимся раскрывом от угла раскрыва (размера *H*). Это позволяет использовать данные разновидности антенн в качестве базовых элементов в более сложных антенных системах, таких как дисковые антенные решетки кругового обзора, для которых наилучшая электродинамическая развязка отдельных излучателей достигается изменением ширины их диаграмм направленности.

## 2. Антенная решетка кругового обзора на основе плоских антенн СВЧ-диапазона с линейно расширяющимся раскрывом

Из анализа характеристик диаграмм направленности, полученных для одиночных линейно расширяющихся щелевых антенн следует, что, если они конструктивно расположены на диске в радиальных от его центра направлениях так, чтобы угол между их центральными осями был равен 45°, то можно разместить до восемь таких антенн, образующих антенную решетку (АР). При этом может быть обеспечен практически полный круговой обзор. Однако эксперимент показал, что при размещении восемь антенн на одном диске создается существенное перекрытие главных лепестков диаграмм направленности соседних антенн, что не обеспечивает приемлемую электродинамическую развязку.

Измерения диаграмм направленности исследовавшихся АР производилось на той же экспериментальной установке, что и одиночные антенны. Сначала исследовалась конструкция, когда к одиночной антенне добавлялась вторая аналогичная антенна, геометрически направленная в противоположную сторону от первой и расположенная на этом же диске. Анализ ДН такой конструкции, изготовленной в виде тонкого алюминиевого диска без подложки, показывает, что в диапазоне частот от 6,0 до 11,5 ГГц их форма оставалась практически неизменной. За пределами указанных граничных частот появлялись существенные искажения ДН, обусловленные недостаточными высокочастотными свойствами полосковых линий питания антенн и детектирующих СВЧ-диодов. При необходимости расширения частотного диапазона имеется возможность заменить указанные элементы на более высокочастотные. Ширина главных лепестков ДН для обеих антенн по уровню половинной мощности в указанном диапазоне частот изменялась в пределах от ~22 до ~50, при изменении угла раскрыва щели каждого элемента, соответственно, от 33,5° до 10,5°.

Приведенные выше характеристики для двух противоположно направленных одиночных антенн позволяют создать конструкцию в виде антенной решетки, имеющей четыре подобные антенны, расположенные друг за другом под углом 90° на одном диске (рис. 4) и обеспечивающие хорошую электродинамическую развязку для случая, когда размер H = 60 мм (2 $\lambda$ )



Рис. 4. Расположение четырех одиночных антенн на металлическом диске

для всех щелей. Полученная диаграмма направленности в Е-плоскости для конструкции с четырьмя антеннами на частоте 10 ГГц приведена на рис. 5.

Очевидно, что перекрытия всего окружающего пространства (и даже достаточно широкого сектора) такая конструкция пока еще не обеспечивает. Наилучший вариант конструкции дисковой антенной решетки кругового обзора представляет собой два подобных, сооснорасположенных диска, азимутально смещенных друг относительно друга на угол 45° (рис. 6) и работающих на разных частотах, что предполагает пространственное и частотное разнесение диаграмм направленности одиночных антенн. Возможность изменения угла раскрыва антенн позволяет изменять ширину главного лепестка ДН каждой из антенн и наилучшим образом производить электродинамическую развязку ДН одиночных антенн.



Рис. 5. Диаграмма направленности дисковой решетки с четырьмя одиночными антеннами

Такая конструкция антенны способна обеспечивать круговой (и любой секторный) обзор. Экспериментально установлено, что оптимальное расстояние между дисками, обеспечивающее требуемую электродинамическую развязку между антеннами верхнего и нижнего дисков, составляет порядка одной длины волны (на частоте 10 ГГц,  $\lambda = 3$  см), что и было учтено в данной конструкции.



Рис. 6. Вид дисковой антенны кругового обзора

### Заключение

В результате проделанной работы получены математические модели, позволяющие рассчитывать диаграммы направленности плоских симметричных антенн с линейно расширяющимся раскрывом. Это дало возможность выявить влияние угла раскрыва антенн на форму диаграмм направленности. Показано, что при увеличении угла раскрыва главный лепесток ДН сужается. Экспериментальное исследование подобных антенн с хорошей точностью подтвердили данные, полученные теоретически, и адекватность полученных моделей. Это позволило наилучшим образом спроектировать конструкцию дисковой антенны кругового (секторного) обзора и обеспечить наилучшую электродинамическую развязку главных лепестков ДН одиночных антенн.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фролов, А. А. Антенна кругового обзора сверхвысокочастотного диапазона / А. А. Фролов, С. В. Гирич, В. П. Заярный // Известия вузов «Радиофизика». – 2012. – Т. 55, № 10–11. – С. 697–703.

2. Janaswamy R., Schaubert D. H., Pozar D.M. // Radio Science. - V. 21. - P. 797-804.

3. Парпула, С. А. Изучение электродинамических характеристик антенн бегущей волны СВЧ-диапазона с линейно-расширяющимся раскрывом / С. А. Парпула, В. С. Гирич, В. П. Заярный // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3(106) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь»; вып. 7). – С. 112–115.

4. Фролов, А. А. Изучение электродинамических характеристик антенн и антенных систем СВЧ-диапазона / А. А. Фролов, С. В. Гирич, В. П. Заярный // Известия вузов «Радиофизика». – 2009. – Т. 52, № 4. – С. 328–335.

5. Sharma A. K., Wilson R. M., Rosen A. // IEEE Antennas & Propagation Society APS. - 1985. - Vol. 6. - P. 97-100.

6. Фролов, А. А. Изучение электродинамических характеристик плоских коротких антенн и антенных решеток СВЧ-диапазона // А. А. Фролов, С. В. Гирич, В. П. Заярный // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2008. – Т. 11, № 4. – С. 33–39.

7. Заярный, В. П. Радиофизические свойства твердотельных слоистых структур с зарядовой связью: методы и информационные возможности для их определения / В. П. Заярный. – М. : Радио и связь, 2001. – 212 с.

## УДК 621.37

## В. Д. Захарченко, Е. В. Верстаков, О. М. Толика V. D. Zakharchenko, E. V. Verstakov, O. M. Tolika

# РАДИОЛОКАЦИОННОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ПРОТЯЖЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРОБОСКОПИЧЕСКОЙ РЛС\* EXTENSIONAL OBJECTS OBSERVATION WITH USE OF STROBOSCOPIC RADAR

### Волгоградский государственный университет Volgograd State University

### E-mail: Zakharchenko VD@mail.ru, Evverstakov@gmail.com

Рассмотрен способ уменьшения информационной избыточности РЛС со сверхразрешением при обзоре протяженных объектов. Предложена структура системы стробоскопической обработки. Статистическим моделированием показана эффективность работы системы на примере участка Волго-Донского судоходного канала.

*Ключевые слова*: стробоскопическая РЛС, протяженный объект, избыточная информация, вероятность пропуска цели, карта местности, элемент разрешения.

The method of information redundancy reduction of radar with the superresolution is considered at the observation of extensional objects. The structure of stroboscopic processing system is offered. Statistical modeling showed overall performance of system on the example of a section of the Volga-Don canal.

*Keywords*: stroboscopic radar, extensional object, redundant information, target missing probability, map locality, resolution cell.

В ряде случаев не требуется знание информации о целях во всем пространстве обзора РЛС. Так, например, для радиолокационного наблюдения за протяженным по углу обзора объектом, занимающим небольшой диапазон дальностей для каждого угла поворота луча радиолокационной станции (РЛС), такой как река, дорога, граница, известные способы наблюдения с использованием радиолокации [1, 2] приводят к избыточности информации, которую несет отраженный сигнал. Сведения об интересующей области пространства содержатся лишь в малой его части.

Частично проблему устраняет стробоскопической способ обработки отраженного сигнала [3]. Стробоскопическая обработка позволяет растянуть во времени полезный участок отражен-

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-01-97041-р\_поволжье\_а).

ного сигнала или, что эквивалентно, сжать его спектр. При этом понижаются требования к быстродействию и широкополосности тракта обработки информации о цели. Для применения стробоскопической обработки отраженного сигнала требуется его повторяемость, которая достигается периодическим излучением зондирующего сигнала РЛС.

Объектам, занимающим небольшой диапазон по дальности, соответствует лишь малая часть всего отклика на зондирующий импульс РЛС. Непосредственная стробоскопическая обработка в преобразователе этого отклика имеет недостаток, связанный с наличием в сигнале большого количества избыточной информации, которая не относится к интересующему интервалу расстояний. Это повышает требования к устройствам обработки и анализа данных систем радиолокационного наблюдения, ухудшает их техникоэкономические показатели.

Для устранения информационной избыточности отраженного сигнала РЛС стробоскопической обработке предлагается подвергать только ту его часть, которая соответствует предварительно заданному картой местности диапазону расстояний  $[R_1(\phi), R_2(\phi)]$  для данного угла поворота  $\phi$  (азимута) луча радиолокатора [4, 5]. Рис. 1 иллюстрирует структурную схему системы стробоскопической обработки, реализующую предлагаемый способ.



Рис. 1. Структурная схема системы стробоскопической обработки

Сигнал с приемника РЛС поступает на стробоскопический преобразователь, и далее – на блок регистрации и обработки информации. Формирователь стробов работает под управлением блока задания временного положения, на который поступает информация о текущем угле  $\varphi$  и зависимость  $t(\varphi)$ , определяющая начало интервала времени, в котором будет производиться стробоскопическая обработка.

Для диапазона расстояний  $R \in [R_1(\phi), R_2(\phi)]$ , соответствующего интервалу времени  $t \in [t_1(\phi), t_2(\phi)]$  в отраженном сигнале  $(t_{1,2} = 2R_{1,2}/c)$ , стробирующие импульсы должны располагаться только в этом интервале. При этом в РЛС не будет поступать избыточная информация об остальном пространстве, а выходной сигнал стробоскопического преобразователя в *k*-м периоде зондирования составит [6]:

$$y(kT) = \frac{1}{T} \int_{kT}^{(k=1)T} A(t - kT_1) dt \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) S(\tau - kT) d\tau.$$
(1)

Здесь h(t) – импульсная характеристики объекта наблюдения; S(t) – импульсы зондирования с периодом T; A(t) – стробирующие импульсы с периодом  $T_1 = T(1+1/N)$ ; N – коэффициент спектральной трансформации [6]; k – номер периода (k = m, m+1, ..., n); m и n – номера стробов, которыми начинается и заканчивается стробирование временного интервала  $t \in [t_1(\phi), t_2(\phi)]$ . Отраженный сигнал для объектов, не лежащих в указанном интервале расстояний, не сканируется стробирующими импульсами, благодаря чему происходит устранение информационной избыточности стробоскопически преобразованного сигнала (1).

В процессе моделирования рассматривался участок Волго-Донского судоходного канала в районе Песковатки (Волгоградская область). По массиву точек  $\{x_k, y_k\}$  географических координат, с использованием линейной сплайновой аппроксимации, были получены координаты  $R_1(\phi)$  и  $R_2(\phi)$  (рис. 2) просматриваемого

стробоскопической РЛС коридора дальности, по которым определяются временные границы

стробирования  $t_1(\phi)$  и  $t_2(\phi)$ , заносящиеся в память блока с таблицей коэффициентов.



Рис. 2. Рассматриваемая часть русла ВДСК в районе Песковатки (а) и ее модель (б)

Модель импульсных характеристик рассеивающих объектов включает в себя суперпозицию стабильного отражателя цели с интенсивностью  $A_0$ , расположенного в центре интервала  $[R_1, R_2]$ 

$$h_0(r,\phi) = A_0 \delta(r - R_0);$$
  

$$R_0(\phi) = \frac{R_1(\phi) + R_2(\phi)}{2},$$
 (2)

и помехи, представляющей собой набор независимых случайных отражателей  $a_k$  в каждом элементе разрешения  $\Delta R$ :

$$h_n(r,\varphi) = \sum_{k=1}^{N} a_k \delta(r - r_k) e^{j\theta_k};$$
  
$$r_k(\varphi) = R_1(\varphi) + k\Delta R; \qquad N = \frac{R_2 - R_1}{\Delta R}; \qquad (3)$$

с интенсивностью  $\sigma$ , распределенных по Релею со случайной начальной фазой  $\theta_k$ :

$$W(a_k) = \frac{a_k}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{a_k^2}{2\sigma^2}\right); \quad W(\theta_k) = \frac{1}{2\pi}.$$
 (4)

Модель апертуры стробоскопической системы (отклик единичной интенсивности на отражение от точечной цели) выбрана гауссовой с разрешением по дальности  $\Delta R_2$ :

$$S(r) = \exp\left(-\pi \frac{r^2}{\Delta R_{\Im}^2}\right)$$

что соответствует эффективной длительности зондирующего и стробирующего радиоимпульсов с гауссовыми огибающими  $\tau_{\Im} = \Delta R_{\Im} \sqrt{2}/c$ . Для  $\Delta R_{\Im} = 10$  м длительность  $\tau_{\Im}$  составляет ~50 нс.





На рис. 3 представлен вид (реализация) отраженного сигнала на выходе амплитудного детектора для шага считывания  $\Delta T = T/N = \tau_{\Im}$ , соответствующего элементу разрешения по дальности  $\Delta R_{\Im}=10$  м. При этом цель находится в центре интервала  $[R_1, R_2]$ ; азимутальный угол  $\varphi = 18$  град.,  $R_0=8950$  м ( $R_1=8700$  м,  $R_2=9200$  м), а интервал дальности  $[R_1, R_2]$  просматривается за 50 периодов тактовой частоты РЛС. При работе стробоскопической РЛС с обзором всего интервала дальности  $R \in [0, R_m]$  выходной сигнал был бы получен за ~1400 периодов.

Если время, необходимое для обзора интервала  $[0, R_m]$ , употребить на обзор коридора  $[R_1, R_2]$ , можно уменьшить шаг считывания  $\Delta T$  в  $M = (R_2 - R_2)/R_m$  раз и осуществить накопление в фильтре стробоскопической системы, существенно улучшив характеристики ее работы.

На рис. 4 показаны полученные статистическим моделированием вероятности пропуска цели ( $P_{np}$ ) на дальности  $R_0$  в зависимости от отношения сигнал/помеха, определяемое как  $q = A_0/\sigma$ . Кривая *l* соответствует шагу считывания  $\Delta T$  (без накопления), а кривая *2* – шагу считывания  $\Delta T/M$  (для  $\phi$ =18 град, M=28). Порог обнаружения выбирался равным  $U_0 = 0.8(A_0 + \sigma)$ .



Рис. 4. Вероятность пропуска цели в зависимости от относительного уровня шума

На рис. 5 показано число ложных целей  $(N_{\text{лц}})$ , фиксируемых стробоскопической РЛС на интервале дальности  $[R_1, R_2]$  с шагом считыва-

ния  $\Delta T$  (кривая *I*) и шагом  $\Delta T/M$  (кривая *2*) для  $\phi$ =18 град и M=28. Характеристики получены усреднением по 400 реализациям сигнала.



Рис. 5. Количество ложных целей в зависимости от относительного уровня шума

Из рисунков следует, что при уровне помех ниже уровня сигнала от цели (q > 1) сужение коридора обзора по дальности до  $[R_1, R_2]$  при одновременном уменьшении шага считывания дает значительное повышение эффективности работы стробоскопической РЛС, снижая почти на порядок вероятность пропуска цели и практически полностью полавляя ложные цели.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

 Радиолокационные методы исследования земли / под ред. Ю. А. Мельника. – М. : Сов. радио, 1980. – 264 с.
 Теоретические основы радиолокации / под ред.

Я. Д. Ширмана. – М. : Сов. радио, 1970. – 560 с.

3. Захарченко, В. Д. Вопросы теории стробоскопического преобразования узкополосных периодических сигналов / В. Д. Захарченко // Изв. ВУЗов СССР. Приборостроение. – 1976. – № 10. – С. 5–8.

4. Захарченко, В. Д. Способ радиолокационного контроля протяженного участка пространства / В. Д. Захарченко, П. Б. Баландин. – Патент РФ № 2359286 от 04.10.2006.

5. Захарченко, В. Д. Устройство радиолокационного контроля / В. Д. Захарченко, В. И. Максименко, О. В. Пак. – Патент РФ № 2469350 от 27.12.2010.

6. Захарченко, В. Д. Обработка сложных радиосигналов стробоскопическими методами / В. Д. Захарченко // АН СССР. Радиотехника и электроника. – 1980. – № 10. – С. 2099–2104.

УДК 004.7:519.2

## A. B. Kapnyxuh A. V. Karpukhin

# МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОТОКОЛА ТСР COMPUTER NETWORK DESIGN METHODS TAKING INTO ACCOUNT FEATURES OF TCP PROTOCOL

## Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Kharkiv national university of radio electronics

### E-mail: kav-102@yandex.ru

Предложена методология исследования высокоскоростных компьютерных сетей с протоколом TCP, проведено математическое моделирование режимов работы таких сетей при различных параметрах. Было показано, что в таких сетях возможно появление нежелательных хаотических явлений, которые приводят к значительному уменьшению пропускной способности сети вследствие возникновения так называемых заторов (congestions). Указанные явления являются следствием сложного поведения самого протокола TCP. Методология основана на классических подходах теории нелинейных динамических систем и использует качественный анализ поведения систем на фазовой плоскости, а также вычисление показателя Ляпунова, являющегося единственным надежным показателем наличия (или отсутствия) хаотических режимов в исследуемой нелинейной динамической системе. Для моделирования использовались симулятор ns-3, а также пакет анализа временных рядов TISEAN.

Ключевые слова: сеть, ТСР, хаос, динамическая система, показатель Ляпунова.

The methodology of the study of high speed of computer networking protocol TCP, mathematical modeling modes such networks under different parameters. Has been shown that in such networks, may cause harmful chaotic phenomena that lead to a significant decrease in the ability of the transmission network as a result of the so-called congestion. These phenomena are due to the complex behavior of the protocol is based on the classic TCP. The methodology is based on the classical theories of nonlinear dynamical systems theory and uses a qualitative analysis of the behavior of systems in the phase space, as well as the calculation of the Lyapunov exponent – only reliable indicator of the presence ( or absence) of chaotic regimes in nonlinear dynamical system. Used for simulation simulator ns-3, and a package of time series analysis TISEAN.

Keywords: network, chaos, TCP/IP, dynamical system, Lyapunov exponent.

#### 1. Введение

В детерминированных динамических системах могут развиться синергетические процессы, такие как возникновение пространственно-временных регулярных структур или хаотичного поведения. В информационных системах, которые работают с предельно большими скоростями передачи данных, наблюдаются нерегулярные режимы спонтанного изменения скорости передачи данных. В таких системах возможные режимы работы, при которых пропускная способность системы становится близкой к нулю вследствие образования так называемых заторов (congestions). Это явление было зафиксировано в начале 90-х годов 20 века некоторыми исследователями, а впоследствии также и ISP (Internet Service Provider). В последние 10–15 лет проблеме самоподобия сетевого трафика было посвящено большое число работ. Библиография содержится, например, в работе [1]. Эти работы можно условно разделить на две группы. Первая (и самая обширная) включает в себя работы, в которых авторы анализируют сетевой трафик и определяют его статистические характеристики. Источником анализируемых данных является либо натурный эксперимент, либо моделирование с помощью программных симуляторов.

Ко второй группе относятся работы (к сожалению, немногочисленные), в которых авторы рассматривают компьютерную сеть как динамическую систему, в которой самоподобие является внутренним свойством самой системы [2, 3, 4]. В настоящей работе предлагается инженерная методика поиска узких мест в компьютерной сети с протоколом TCP и устранения (или уменьшения) отрицательных последствий (образование так называемых заторов) их наличия.

## 2. Состояние вопроса

В работах [3, 4] авторами была предложена методология исследования высокоскоростных компьютерных сетей с протоколом ТСР, проведено математическое моделирование режимов работы данных сетей при различных параметрах. Было показано, что в таких сетях возможно появление нежелательных хаотических явлений, которые приводят к значительному уменьшению пропускной способности сети вследствие возникновения так называемых заторов (congestions). Указанные явления – следствие сложного поведения самого протокола ТСР. Методология основана на классических подходах теории нелинейных динамических систем и использует качественный анализ поведения систем на фазовой плоскости, а также вычисление показателя Ляпунова, являющегося единственным надежным показателем наличия (или отсутствия) хаотических режимов в исследуемой нелинейной динамической системе. Для моделирования использовались симулятор NS-3 [5], а также пакет анализа временных рядов TISEAN [6].

Были выявлены основные параметры, определяющие режим работы сети: размер буфера маршрутизатора, пропускная способность канала и задержка канала. Заторы возникают в некоторых участках сети при определенных значениях вышеуказанных параметров. Такие участки получили название bottleneck. В результате проведенных экспериментальных исследований модельной сети (test bed) было получено хорошее согласие результатов симуляции с помощью NS-3 и вычисления показателя Ляпунова с помощью пакета TISEAN.

Дальнейшим шагом является разработка инженерной методики исследования сетей, которая позволила бы проектировать достаточно большие сети и модифицировать их в процессе эксплуатации в течение жизненного цикла (имеются в виду так называемые автономные системы, управляемые одним администратором).

### 3. Алгоритм поиска узкого места в автономной системе

В автономной системе администратор имеет возможность управлять параметрами сети, влияющими на характер режима ее работы, и, таким образом, либо исключить возможность появления хаотических режимов либо свести к минимуму негативные последствия их возникновения.

### Моделирование перегрузки

Для изучения процессов, происходящих в компьютерной сети, состояние перегрузки моделировалось с помощью дискретно-временного симулятора с открытым исходным кодом NS-3. Симулятор предоставляет исследователю набор классов, используя которые можно смоделировать широкий спектр протоколов и процессов, происходящих в компьютерных сетях. Также симулятор позволяет моделировать процессы в реальном времени и интегрировать его с испытательным стендом, делать испытательный стенд частью моделируемой сети и т. д. NS-3 используется в качестве инструмента большим количеством исследователей в течение достаточно длительного периода времени, а также содержит множество тестов для большинства компонент, что гарантирует достоверность получаемых результатов. С помощью NS-3 создавалась модель сети ТСР/ІР (см. рис. 1). В данной модели все хосты связаны с маршрутизатором соединением типа точка-точка. На хостахотправителях моделировалась работа приложения, посылающего данные через сеть с постоянной скоростью (битрейтом) хосту-получателю, где моделировалась работа приложения, принимающего данные от обоих отправителей. В данной модели предусматривалась возможность варьирования различных параметров: скорости генерирования данных отправителями (C<sub>f</sub>), задержку (d<sub>b</sub>) и пропускную способность (C<sub>b</sub>) каналов в узком месте, а также задержку (d)

и пропускную способность (С) каналов. Также изменялся еще один параметр – размер очереди передачи данных типа Drop Tail (Qs) на сетевом интерфейсе маршрутизатора, соединенном с получателем. Следует отметить, что задержка d в каналах отправителей и получателя связана с конечностью распространения электромагнитных волн и не учитывает задержку в обработке пакетов данных хостами и маршрутизатором. Окно принимающего хоста (receiving window, rwnd) было преднамеренно сделано очень большим, чтобы лимитирующим фактором было только значение окна перегрузки (congestion window, cwnd).

Для изучения состояния перегрузки, возникающего в сети, было проведено несколько численных экспериментов, где хосты-отправители посылали данные со скоростью, превышающей пропускную способность канала получателя. Очередь передачи данных на маршрутизаторе, таким образом, переполнялась, так как он не может посылать данные со скоростью, большей, чем позволяет физический канал связи и лишние пакеты начинали отбрасываться.

Ключевыми параметрами, влияющими на возникновение перегрузки, в данном случае являются (при достаточно большом С и малом d): Cf, db, Cb, и Qs, поэтому, в дальнейшем, при описании численных экспериментов, будут приводиться значения только этих параметров.



Рис. 1. Топология модельной сети (test bed)

Даже в такой простой системе с двумя TCPсоединениями количество переменных, характеризующих состояние данной системы, очень велико. Но можно выбрать соответствующее сечение фазового пространства путем надлежащего выбора этих переменных. В качестве такой переменной было выбрано значение окна перегрузки (cwnd), так как оно непосредственно влияет на объем пересылаемых данных.

В процессе моделирования перегрузки в сети отслеживалось значение cwnd для каждого TCP-соединения.

Однако для того, чтобы более подробно изучить данный процесс, одной зависимости cwnd от времени недостаточно. Проблема состоит в том, что значения окна перегрузки – это всего лишь проекция полного набора переменных динамической системы на фазовую плоскость. К тому же функция cwnd (t) не является непрерывной. Другая проблема также состоит в том, что, начиная с определенного момента времени, значение окна перегрузки не позволяет делать выводы о состоянии системы во всех деталях.

В работе использовались усредненные по N значения временного ряда:  $[x_t, x_{t-\delta t}, x_{t-2\delta t}, ...]$ , как легко измеримые характеристики сложных систем для восстановления скрытых многомерных траекторий. Данный метод, примененный к значениям окна перегрузки (cwnd), приводит к соотношениям:

$$x[i] = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} cwnd_{x}[i-j],$$
  
$$y[i] = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} cwnd_{y}[i-j].$$

Здесь *х* и *у* обозначают каждый из ТСР потоков. Величина N отвечает за масштаб усреднения, и чем больше N, тем больше скрытых размерностей системы может быть восстановлено. Пересчет данных из имеющихся временных рядов согласно приведенным соотношениям выполнялся созданной для этого утилитой, входными параметрами которой являются имя файла для пересчета и N.

Для дальнейшего анализа полученных данных необходимо построить фазовый портрет – зависимость  $cwnd_1$  ( $cwnd_2$ ). С этой целью необходимо взять значение  $cwnd_1$  и  $cwnd_2$  в один момент времени. В нашем случае зависимость cwnd (t) различна для каждого из хостов и представляет собой ступенчатую функцию, так как в промежутке между изменениями это значение хранится в памяти машины. Для анализа этих данных была написана специальная утилита, которая считывает данные  $cwnd_1$  и  $cwnd_2$  из файлов и выводит точки фазового пространства.

Фазовые портреты удобны тем, что не только могут наглядно отобразить состояние дина-
мической системы, но и тем, что с их помощью можно легко рассчитать максимальный показатель Ляпунова<sup>1</sup> (Maximum Lyapunov Exponent, MLE) - величину, которая характеризует скорость разбегания близких траекторий, положительное значение которой обычно принимается как индикатор хаотического поведения системы. Однако построить фазовый портрет системы удается только в небольшом количестве случаев. При добавлении одного нового отправителя в моделируемую систему размерность исследуемого фазового пространства тоже будет увеличиваться на единицу и анализировать полученные данные будет все сложнее, не говоря о том, что визуализация фазового пространства возможна, только если его размерность меньше 4.

Таким образом, необходим инструмент, который позволит производить анализ получаемых данных независимо от количества имеющихся ТСР-сеансов. Для этой цели был выбран пакет утилит TISEAN, предназначенный для анализа временных рядов и основанный на теории нелинейных детерминированных динамических систем или теории хаоса. TISEAN представляет собой реализацию ряда алгоритмов теории хаоса, однако эти алгоритмы не дают «простых» ответов на вопросы, учитывая новизну области исследования, где необдуманное использование алгоритмов может привести к неверным, неясным или ложным результатам. Поэтому, например, на вопрос о размерности аттрактора не будет получено конечного числового ответа, а вместо этого будет подсчитана корреляционная сумма, которая может быть проанализирована другими утилитами пакета, ответственность за правильную интерпретацию результатов работы которых лежит на исследователе.

### Поиск узкого места

Наиболее эффективным (хотя и более трудоемким) методом поиска узкого места является экспериментальное исследование трафика. Очевидно, что можно выделить несколько таких мест в реальной сети, отличающихся «степенью узости». Ликвидация узкого места (и последствий его наличия) состоит в изменении наиболее важных параметров, влияющих на поведение сети, а именно Cf, db, Cb, Qs, C, d. Необходимо выбрать значения этих параметров, при которых перегрузка не будет возникать (или хотя бы будет меньше).



Рис. 2. Топология реальной сети

Компьютерную сеть (автономную систему) можно представить в виде полного графа и рассчитать трафик во всех его ребрах (каналах).

## 4. Методика проектирования автономной системы с максимальной пропускной способностью

Рассмотрим эти параметры с точки зрения возможности их изменения.

Параметр Qs прямо зависит от размера буфера маршрутизатора, величина которого может быть изменена администратором автономной системы программно. Изменение всех остальных параметров выполнить значительно сложнее. Для этого необходимо провести модернизацию технической базы сети (заменить каналы в узких местах на более производительные и с меньшей задержкой), что потребует, возможно, значительных материальных и финансовых затрат. Решение о проведении соответствующей реконструкции сети в данном случае будет приниматься после сравнения затрат на такую реконструкцию и потерь при существующей структуре сети вследствие возникновения перегрузок И значительного уменьшения пропускной способности. В некоторых случаях потери могут быть критическими и привести к выходу из строя всей сети. Это может иметь место в таких областях, как экспериментальные исследования в так называемых Fast Long Distance Networks (например, совместные международные эксперименты на адронном коллайдере в CERN и Лос-Аламосской лаборатории по исследованию элементарных частиц в США), актуальность которых в последние годы не вызывает сомнений.

В данной работе предлагается математическая модель взаимодействующих TCP-соединений в виде ансамбля нелинейных математических маятников, в котором каждое TCPсоединение выступает в роли такого маятника. В этом случае *n* TCP-соединений можно описать следующей системой дифференциальных уравнений:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Например, используя алгоритм Бенеттина [7]

$$\begin{aligned} x_1^{"} + \omega_1^2 \sin x_1 &= \Phi_1(t, x_2, x_3..., x_n) \\ x_2^{"} + \omega_2^2 \sin x_2 &= \Phi_2(t, x_1, x_3..., x_n) \\ x_i^{"} + \omega_i^2 \sin x_i &= \Phi_i(t, x_1, x_3..., x_n) \\ \dots \\ x_n^{"} + \omega_n^2 \sin x_n &= \Phi_n(t, x_1, x_2, x_3...), \end{aligned}$$
(1)

где  $x_i$  – количество пакетов в секунду в *i*-м TCP-соединении;  $\Phi_n$  – функция, зависящая от битрейта (bitrate) каждого TCP-соединения и, кроме того, определяющая взаимное влияние TCP-соединений друг на друга;  $\omega_i^2$  – «собственная частота» TCP-соединения, которая зависит, в первую очередь, от размера буфера, пропускной способности и задержки канала, в котором взаимодействуют все *n* TCP-соединений.

Исходя из физических соображений, начальные условия должны быть заданы в виде

$$\begin{aligned} (x_1)_{t=0} &= x_1^0, \ (x_2)_{t=0} &= x_2^0, \ \dots, \\ & (x_i)_{t=0} &= x_i^0, \ \dots, \ (x_n)_{t=0} &= x_n^0; \\ (x_1^{'})_{t=0} &= 0, \ (x_2^{'})_{t=o} &= 0, \ \dots, \\ & (x_i^{'})_{t=0} &= 0, \ (x_n^{'})_{t=0} &= 0, \end{aligned}$$

где  $x_1^0$ ,  $x_2^0$ , ...,  $x_i^0$ , ...,  $x_n^0$  – начальные значения независимых переменных.

Характер движений маятника существенно зависит от начальной энергии (начальной амплитуды) колебаний (т. е. скорости генерации трафика в отдельных TCP-соединениях). Очевидно, что при тех значениях параметров колебательной системы, при которых наблюдаются хаотические явления, начальные значения должны быть выбраны достаточно большими, т. е. соответствующими нахождению изображающей точки вблизи сепаратрисы, являющейся границей раздела колебательных и вращательных движений каждого из маятников.

В первом приближении можно считать, что все  $\omega_i$  равны, так как все TCP-соединения совместно используют линию связи и буфер маршрутизатора. Отличие состоит в фазе колебаний маятников, описывающих отдельные TCP-соединения. Хотя в действительности эти частоты различаются, так как отдельные TCPсоединения имеют различные значения RTT (Round Trip Time).

Было проведено моделирования тестовой сети (рис. 2) с n отправителями (n = 32), т. е. в случае, когда 32 ТСР-соединения работают одновременно в одном канале (так называемое «узкое место», bottleneck). В результате решения системы (1) был построен фазовый портрет для двух выбранных ТСР-соединений, а также вычислен максимальный показатель Ляпунова. Результаты подтвердили адеквавертность модели (1).

Результаты проведенных расчетов приведены на рис. 3 (фазовый портрет) и рис. 4 (максимальный показатель Ляпунова).





Из анализа результатов (рис. 3, 4) следует, что при приведенных значениях параметров рассматриваемая динамическая система находится в хаотическом режиме.

Для той же тестовой сети с такими же параметрами был проведен физический эксперимент. Характер полученного временного ряда подтвердил вывод о наличии хаотического режима работы тестовой сети (рис. 5).

Результаты физического эксперимента качественно подтверждают результаты математического моделирования: при наличии хаотического режима работы сети наблюдается характерный вид временного ряда для трафика.

# 5. Выводы и направления дальнейших исследований

Внести технические изменения во всей сети Internet и таким образом уменьшить вероятность возникновения заторов практически невозможно в первую очередь по экономическим причинам. Наглядным примером является внедрение насущно необходимого нового варианта протокола IPv6.

Но даже в относительно больших по размерам автономных системах после проведения анализа сети на наличие узких мест можно дать конкретные рекомендации по их устранению. Разработанную методику можно использовать и при проектировании новой сети, а также в процессе эксплуатации сети в течение ее жизненного цикла.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на автоматизацию процесса проектирования и дальнейшей эксплуатации сетей автономных систем с тем, чтобы дать в руки администраторов и технических служб эффективные средства решения периодически возникающих проблем в сетях, связанных с уменьшением общей производительности.

Такими средствами должны стать: аппаратно-программный комплекс анализа режимов работы сетей, а также инженерная методика исследования и эксплуатации сетей, обеспечивающая высокую производительность последних в течение всего жизненного цикла.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпухин, А. В. Математическое моделирование хаотических явлений в высокоскоростных сетевых информационных системах с протоколом TCP / А. В. Карпухин // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС. – 2009. – Віп. 4(78). – С. 64–69.

2. Veres A, Boda V. The chaotic nature of TCP congestion control // In Proc. IEEEINFOCOM. – 2000. – P. 1715–1723.

3. А. V. Karpukhin, I.N. Kudryavtsev, A.V. Borisov, D.I. Gritsiv. High-speed communication networks chaotic behavior analysis of data systems. «Вісник Харківського національного університету» імені В. Н. Каразіна (серія: фізична «Ядра, частинки, поля») № 1017, вип. 3, с. 138–145, 2012 р.

4. *Haengmuk Cho*, Alexander V. Karpukhin, Igor N. Kudryavtsev, Alexander V. Borisov, Dmitriy I. Gritsiv. Computer Simulation of Chaotic Phenomena in High-Speed Communication Networks. Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol.11 No.3 2013, P. 113-122.

5. Simulator NS-3 and concomitant documentation [Online resource]. – Access mode: <u>http://nsnam.org</u>.

6. Hegger R., Kantz H., Schreiber T. The package of TISEAN programs and concomitant documentation [Online resource]. – Access mode: http://www.mpipks-dresden.mpg. de/~tisean/.

7. Benettin G., Galgani L., Giorgilli A., Strelcyn J.M., 'Lyapunov characteristic exponents for smooth Dynamical systems; a method for computing all of them'. P a  $\sim 1$ : Theory; Part 2 : Numerical application, Meccanica March 1980.

#### Научное издание

## И З В Е С Т И Я Волгоградского государственного технического университета № 10(137), 2014 г.

## Серия «ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ» (Выпуск 9)

#### Межвузовский сборник научных статей

Редактор Л. Н. Рыжих Компьютерная верстка Е. В. Макаровой

Темплан 2014 г. (научные издания). Поз. № 16 н. Подписано в печать 27.06.2014. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,02. Уч.-изд. л. 13,24. Тираж 150 экз. Заказ

Волгоградский государственный технический университет. 400005, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28, корп. 1.

Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ. 400005, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28, корп. 7.