

**ВЕСТНИК**  
**САРАТОВСКОГО**  
**ГОСУДАРСТВЕННОГО**  
**ТЕХНИЧЕСКОГО**  
**УНИВЕРСИТЕТА**  
**2010**

**№ 4 (51)**  
**Выпуск 3**

Проблемы естественных наук  
Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.  
Выходит один раз в квартал  
Декабрь 2010 г.

*Журнал включен в перечень ведущих  
рецензируемых журналов и научных изданий,  
утвержденный президиумом ВАК  
Министерства образования и науки РФ,  
в которых публикуются основные научные  
результаты диссертаций на соискание  
ученых степеней доктора и кандидата наук*

**Главный редактор**  
**Зам. главного редактора**  
**Ответственный секретарь**

д.и.н., профессор И.Р. Плеве  
д.т.н., профессор А.А. Сытник  
д.т.н., профессор А.А. Игнатъев

**Редакционный совет:** д.э.н. В.Р. Атоян, д.т.н. В.И. Волчихин, д.т.н. В.А. Голенков,  
д.и.н. В.А. Динес, д.х.н. В. Зеленский (Польша), д.т.н. В.А. Игнатъев, д.т.н. В.В. Калашников,  
д.т.н. И.А. Новаков, д.и.н. И.Р. Плеве (председатель), д.т.н. А.Ф. Резчиков,  
д.социол.н. С.Б. Суоров, д.т.н. А.А. Сытник (заместитель председателя), д.ф.-м.н. Ян Аврейцевич (Польша),  
д.э.н. Улли Арнольд (Германия), д.ф.-м.н. Энтони Мерсер (Великобритания),  
д.э.н. Эде Соузе Феррейра (Португалия), д.т.н. Т. Чермак (Чехия), д.э.н. Ю.В. Шленов.

**Редакционная коллегия:** д.т.н. К.П. Андрейченко, д.т.н. Ю.С. Архангельский,  
д.филос.н. А.С. Борщов, д.т.н. А.С. Денисов, д.т.н. Ю.Г. Иващенко, д.т.н. Ю.Н. Климочкин,  
д.т.н. В.А. Коломейцев, д.т.н. А.В. Королев, д.т.н. В.А. Крысько, д.и.н. Г.В. Лобачева,  
д.т.н. В.И. Лысак, д.т.н. В.Н. Лясников, д.т.н. А.И. Финаенов, д.т.н. М.А. Щербаков.

Редактор Л.А. Скворцова  
Компьютерная верстка С.В. Пчелинцевой  
Перевод на английский язык Ю.С. Ольховцева

Адрес редакции:  
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77  
Телефон: (845 2) 99 86 38  
E-mail: vestnik @ sstu. ru  
<http://dni. sstu. ru/vestnik.nsf>  
Факс: (845 2) 52 53 02

Подписано в печать 01.12.10  
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.  
Усл. печ. л. 23,5 Уч.-изд. л. 10,0  
Тираж 500 экз. Заказ 465  
Отпечатано в Издательстве СГТУ,  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

**Подписной индекс 18378**  
(каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2011 г.)

ISSN 1999-8341

© Саратовский государственный  
технический университет, 2010

**VESTNIK  
SARATOV  
STATE  
TECHNICAL  
UNIVERSITY  
2010**

**№ 4 (51)  
Edition 3**

Scientific Journal

Since 2003  
Once in a quarter  
December 2010

*This journal is included into the list of leading reviewed journals and scientific publications approved by the presidium of Ministry of Education and Sciences of Russian Federation where major scientific results for academic degree competition for a doctor and a candidate of sciences*

**Editor-in-chief** Doctor of Historical Sciences, Pr. I.R. Pleve  
**Editor-in-chief assistant** Doctor of Technical Sciences, Pr. A.A. Sytnik  
**Executive secretary** Doctor of Technical Sciences, Pr. A.A. Ignatyev

**Drafting committee:** Pr. V.R. Atoyán, Pr. V.I. Volchihin, Pr. V.A. Golenkov, Pr. V.A. Dines, Pr. V. Zelensky (Poland), Pr. V.A. Ignatyev, Pr. V.V. Kalashnikov, Pr. I.A. Novakov, Pr. I.R. Pleve (Chairman), Pr. A.F. Rezchikov, Pr. A.A. Sytnik (Vice of the Chairman), Pr. S.B. Surovov, Pr. Yan Avreytsevich (Poland), Pr. Ulli Arnold (Germany), Pr. Anthony Merser (UK), Pr. E. D'Sousa Ferreira (Portugal), Pr. T. Chermak (Chezh Republic), Pr. Y.V. Shlenov.

**Editorial board:** Pr. K.P. Andreychenko, Pr. Y.S. Arkhangelsky, Pr. A.S. Borshov, Pr. A.S. Denisov, Pr. Y.G. Ivashenko, Pr. Y.N. Klimochkin, Pr. V.A. Kolomeitsev, Pr. A.V. Korolyov, Pr. V.A. Krysko, Pr. G.V. Lobatcheva, Pr. V.I. Lysak, Pr. V.N. Lyasnikov, Pr. A.I. Finaenov, Pr. M.A. Sherbakov.

Editor L.A. Skvortsova  
Computer-based page-proof S.V. Pchelintseva  
Rendering Yu.S. Olkhovtseva

Editorial office: 77, Politechnicheskaya Street  
Saratov, 410054  
Russia  
Telephone: +8(8452) 99 86 38  
E-mail: vestnik @ sstu. ru  
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>  
Fax: +8 (8452) 52-53-02

Signed for publishing 01.12.10  
Format 60×84 1/8 Paper offset.  
Apr. tp. l. 24,0 Acc.-pbl. l. 10,0  
Edition 500 psc. Order 465  
Printed in Publishers of SSTU,  
77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

## СОДЕРЖАНИЕ

### ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

<b>Ершов А.С., Терентьев А.А., Байбурин В.Б.</b> Численное решение уравнения Пуассона для областей с нелинейными границами в моделях магнетронных приборов.....	7
<b>Овчинникова Н.В., Чеботаревский Ю.В.</b> К расчету напряженно-деформированного состояния упругопластического полупространства, контактирующего с абсолютно жестким индентором.....	10
<b>Ушакова О.В., Зимняков Д.А., Кириллов К.И.</b> Исследование диффузного отражения света от среды с выраженной структурной анизотропией .....	17
<b>Галушка В.В., Биленко Д.И.</b> Снижение влияния артефактов при рентгеноспектральном микроанализе в электронной микроскопии .....	20
<b>Иващенко Ю.Г., Козлов Н.А., Тимохин Д.К.</b> Оценка влияния минеральных добавок природного и техногенного происхождения на кинетику формирования прочности мелкозернистого бетона.....	25
<b>Маляр И.В., Стецюра С.В.</b> Модификация поверхности полупроводниковой подложки с помощью органических монослойных покрытий и воздействия излучений .....	29
<b>Наумова С.В., Мельников С.В., Поляков С.В.</b> Определение ионов тяжелых металлов в сывороточном альбумине методом импульсной фосфориметрии.....	35
<b>Сухинина Н.С., Масалов В.М.</b> Коллоидные частицы диоксида кремния для финишной полировки полупроводниковых материалов .....	38
<b>Орлов Б.С., Королев А.В., Ермольчева Н.В.</b> К вопросу технологического обеспечения микрорельефа поверхностей деталей, обработанных дискретным вибрационным резанием .....	43
<b>Мухаметрахимов Р.Х., Изотов В.С.</b> Разработка цементно-волоконистых плит на основе целлюлозных волокон .....	47
<b>Муллин В.В., Розов А.С., Максименко Б.Н., Байбурин В.Б.</b> Особенности переходных процессов в «длинной линии» в точке разрыва.....	52
<b>Розов А.С., Байбурин В.Б.</b> Выбор затравочного приближения в итерационном методе решения уравнения Лапласа.....	55
<b>Спицын И.Л., Байбурин В.Б.</b> Методика определения акустическим анализатором расхода песка и твердых включений.....	57

### ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

<b>Корчагин А.И., Мирошниченко А.Ю., Царев В.А.</b> Результаты математического моделирования двухзачорных резонаторов для мощных многолучевых клистродов, работающих в режиме умножения частоты .....	60
<b>Сенчуров В.А., Царев В.А.</b> Исследование характеристик двухзачорных многолучевых пространственно-развитых резонаторов .....	65
<b>Мучкаев В.Ю., Царев В.А.</b> Расчет характеристического сопротивления клистронных резонаторов сложной формы с помощью трехмерной электродинамической модели .....	69
<b>Сивяков Б.К., Аврясова О.С.</b> Математическое моделирование электромагнитного поля электроустановок.....	73
<b>Левин Д.С., Карнаух А.В., Вырыханов Д.А., Угаров Г.Г.</b> Использование грозозащитного троса в качестве резервной фазы на воздушных линиях электропередачи .....	75
<b>Голембиовский Ю.М., Тимофеева О.В.</b> Многомодульные однофазные преобразовательные сети.....	81
<b>Мусатов М.В., Моисеев А.С., Львов А.А.</b> Применение общего метода наименьших квадратов при испытаниях АЦП.....	85

### АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

<b>Бровкова М.Б., Свиридов С.В., Сидоров Н.С.</b> Разработка системы критериальных оценок состояния сложного технологического оборудования .....	89
--	----

<b>Семагин А.А., Чуркин Г.М.</b> Выбор многофункциональных элементов структуры системы управления .....	95
<b>Степанов М.Ф., Кулаков К.А.</b> Исследование эффективности группового управления роботами методом имитационного моделирования.....	98
<b>Лисицкий Д.Л., Лисицкий Л.А.</b> Анализ и синтез сау движущихся объектов с учетом нелинейностей привода управляющих органов .....	102
<b>Луценко И.В.</b> Математическая модель вспомогательной силовой установки самолета.....	109
<b>Большаков А.А., Глазков В.П., Егоров И.В., Лавров А.В.</b> Создание метода динамической коррекции движения манипулятора на основе нейронных сетей .....	114
<b>Миргородская Е.Е., Митяшин Н.П., Томашевский Ю.Б., Радионова М.В.</b> Управление структурой преобразовательного комплекса при реализации технологии «Smart grid».....	121
<b>Степанов М.Ф., Степанов А.М.</b> Интеллектуальная самоорганизующаяся система управления с вычислителем управляющего воздействия на основе автоматически конструируемой нейронной сети .....	126
<b>Медведева О.Н., Фролов В.О.</b> Сравнение вариантов систем газоснабжения потребителей.....	128
<b>Осипова Н.Н., Рогова Н.С.</b> Оптимизация энергопотребления индивидуальных жилых зданий .....	133

#### **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

<b>Киселев В.В., Руденко А.Е., Светлов М.С.</b> Моделирование цифровых систем телерадиовещания с квадратурной амплитудной манипуляцией.....	140
<b>Киселёв В.В., Львов А.А., Светлов М.С.</b> Разработка программной модели одночастотной сети цифрового вещания стандарта DVB-T .....	143
<b>Киселёв В.В., Львов А.А., Светлов М.С.</b> Особенности моделирования одночастотных сетей цифрового телерадиовещания стандарта DVB-T .....	145
<b>Спиридонов С.В., Светлов М.С.</b> Механизм определения разности фаз сигналов как метод исключения «паразитного» влияния отраженных сигналов в системах цифрового телерадиовещания стандарта DVB-T.....	150
<b>Светлов М.С., Попов М.А., Руденко А.Е.</b> Параметры квантования по времени в DVB-T. Технология Time Slicing.....	152
<b>Львов А.А., Мухамбетжанов А.С.</b> Алгоритм локализации спектральных пиков.....	154
<b>Мусатов М.В., Половикова В.Б., Моисеев А.С., Львов А.А.</b> Анализ алгоритмов тестирования АЦП, основанных на методе наименьших квадратов.....	156
<b>Кожанова Е.Р., Захаров А.А., Ткаченко И.М.</b> Разработка программного продукта по использованию вейвлет-функций для анализа сигналов различного вида.....	160
<b>Мащенко А.А., Лашков А.В., Мусатов В.Ю., Сысоев В.В.</b> Разработка нейрочипов на ПЛИС для обработки сигналов мультисенсорных систем для идентификации газов ....	164
<b>Глазков В.П., Егоров И.В., Лачугин Д.В.</b> Нейросетевое распознавание трехмерных объектов на основе информации о пространственных координатах точек поверхности.....	167
<b>Паранькина А.С., Денисов А.В.</b> Моделирование причинно-следственных связей в задачах повышения качества электроэнергии, генерируемой преобразователем частоты .....	172
<b>Большаков А.А., Степанов М.Ф., Степанов А.М., Ульянина Ю.А.</b> Планирование траектории движения мобильного робота .....	176
<b>Иванникова О.А.</b> Ситуационный подход в создании математической модели интеллектуального здания .....	180
<b>Ермаков А.В.</b> Разработка и анализ метода повышения эффективности обработки видеoinформации с использованием Grid-вычислений .....	184

## CONTENTS

### PROBLEMS OF NATURAL SCIENCES

---

<b>Yershov A.S., Terentyev A.A., Baiburin V.B.</b> Numerical solution of Poisson equation for areas with nonlinear boundaries in models of M-type devices .....	7
<b>Ovchinnikova N.V., Chebotarevsky U.V.</b> One computational method for strain-stress analysis of elasto- plastic half-space in contact with rigid indenter .....	10
<b>Ushakova O.V., Zimnyakov D.A., Kirillov K.I.</b> Study of the light diffuse reflectance from a medium with the expressed structural anisotropy .....	17
<b>Galushka V.V., Bilenko D.I.</b> Decrease in influence of artefacts at energy dispersive X-ray analysis in electronic microscopy .....	20
<b>Ivashchenko Y.G., Kozlov N.A., Timokhin D.K.</b> Assessment of mineral supplements for natural and man-made origin on curing kinetics fine concrete .....	25
<b>Malyar I.V., Stetsyura S.V.</b> The surface modification of semiconductor substrate by organic monolayer coatings and irradiation .....	30
<b>Naumova E.V., Melnikov A.G., Polyakov A.A.</b> Heavy metals ions detection in the human serum by the method of pulse phosphorescence .....	35
<b>Sukhinina N.S., Masalov V.M.</b> Silica colloid particles for finished polishing of semiconductor materials .....	39
<b>Orlov B.S., Korolyov A.V., Ermol'cheva N.V.</b> To question of the technological provision of the mikrorelief surfaces of the details, processed by discrete vibratory cutting.....	43
<b>Muhametrahimov R.H., Izotov V.S.</b> Development cement-fiber board based on cellulose fibers .....	47
<b>Mullin V.V., Rozov A.S., Maksimenko B.N., Baiburin V.B.</b> Transition process in the «long line» at the point of discontinuity .....	53
<b>Rozov A.S. , Baiburin V.B.</b> Choice of initial approximation for iterative method of Laplas equation solving .....	58

### ELECTRONICS, RADIOENGINEERING AND INSTRUMENT MARKING

---

<b>Korchagin A.I., Miroshnichenko A.Yu., Tsarev V.A.</b> The results of numerical modeling of two-gaps cavity for powerful multi-beam iot working as the frequency multiplier.....	60
<b>Senchurov V.A., Tsarev V.A.</b> Investigation characteristics of double-gap multibeam spatially-developed cavity .....	65
<b>Muchkaev V.Y., Tsarev V.A.</b> Calculation of characteristic impedance of klystrons cavity with irregular shape by means of three-dimensional electrodynamic model .....	69
<b>Sivvyakov B.K., Avryasova O.S.</b> Mathematical modeling of electromagnetic field electric.....	73
<b>Levin D.S., Karnauh A.V., Virihanov D.A., Ugarov G.G.</b> Using of a hawser, as reserve phase, on overhead transmission lines.....	76
<b>Golembiovskiy Y.M., Timofeeva O.V.</b> The multimodule single-phase transforming nets.....	81
<b>Musatov M.V., Moiseev A.S., L'vov A.A.</b> Using generalised least squares method for ADC testing .....	85

### AUTOMATION AND MANAGEMENT

---

<b>Brovkova M.B., Sviridov S.V., Sidorov N.S.</b> The system of criterion evaluation of complex engineering equipment performance .....	89
<b>Semagin A.A., Churkin G.M.</b> Choice of multipurpose elements of structure of a control system .....	95
<b>Stepanov M.F., Kulakov K.A.</b> Automatic problem solving of the analysis and synthesis of control systems by plant with nonlinearity .....	99

<b>Lisitsky D.L., Lisitsky L.A.</b> Analysis and synthesis of acs of moving objects with a nonlinear drive of control elements .....	103
<b>Lutsenko I.V.</b> Mathematical model of auxiliary powerplant of aircraft.....	109
<b>Bolshakov A.A., Glazkov V.P., Egorov I.V., Lavrov A.V.</b> Creation manipulator movement dynamic correction method ased on neural networks.....	114
<b>Mirgorodskaya E.E., Mityashin N.P., Tomashevskiy Y.B., Radionova M.V.</b> Control of structure of the power converting complex at technology realization «Smart grid».....	121
<b>Stepanov M.F., Stepanov A.M.</b> Intellectual self-organizing control system with controller on the automatically designed neural network .....	126
<b>Medvedeva O.N., Frolov V.O.</b> Comparison of options for systems of gas supply to consumers.....	129
<b>Osipova N.N., Rogova N.S.</b> Optimization of energy consumption of individual residential buildings .....	134

#### **INFORMATION TECHNOLOGIES**

<b>Kiselev V.V., Rudenko A.E., Svetlov M.S.</b> Simulation of the digital television broadcasting systems with quadrature amplitude modulation .....	140
<b>Kiselev V.V., L'vov A.A., Svetlov M.S.</b> Working out of program model of a unifrequent network of a digital announcement of standart DBV-T .....	143
<b>Kiselev V.V., L'vov A.A., Svetlov M.S.</b> The features of simulation of single frequency digital television broadacting nets under the DVB-T standart.....	146
<b>Spiridonov S.V., Svetlov M.S.</b> The mechanism of calculation of the phase difference as method of excluding the parasitical influence of the reflected signals in the digital television system of DVB-T standart .....	150
<b>Svetlov M.S., Popov M.A., Rudenko A.E.</b> Parameters of quantum at times in DVB-H. Time slicing technology.....	152
<b>L'vov A.A., Mukhambetzhano A.S.</b> An algoritm for localization of spectral peaks.....	155
<b>Musatov M.V., Polovikova V.B., Moiseev A.S., L'vov A.A.</b> Analisis of the adc testing least squares techniques .....	157
<b>Kozhanova E.R., Zaharov A.A., Tkachenko I.M.</b> Development of software product on the use of wavelet-functions for analysis of signals of different kind.....	160
<b>Maschenko A.A., Lashkov A.V., Musatov V.Yu., Sysoev V.V.</b> Development neurochip FPGA for signals analysis multisensor systems for identification of gas .....	165
<b>Glazkov V.P., Egorov I.V., Lachugin D.V.</b> Neural network pattern recognition of three dimensional objects based on the spatial coordinates of surface points.....	167
<b>Parankina A.S., Denisov A.V.</b> Modelling of relationships of cause and effect in problems of improvement of quality of the electric power generated by the converter of frequency.....	172
<b>Bolshakov A.A., Stepanov M.F., Stepanov A.M., Uljanina J.A.</b> Planning of a trajectory of movement of the mobile robot.....	176
<b>Ivannikova O.A.</b> The situational approach in creation of mathematical model of an intellectual building .....	181
<b>Ermakov A.V.</b> Development and analysis of increased video information processing efficiency method with using of GRID-computing .....	184

---

## ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

---

УДК 621.372

**А.С. Ершов, А.А. Терентьев, В.Б. Байбурин****ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ПУАССОНА ДЛЯ ОБЛАСТЕЙ  
С НЕЛИНЕЙНЫМИ ГРАНИЦАМИ В МОДЕЛЯХ МАГНЕТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

*Получено решение цилиндрического двумерного уравнения Пуассона методом Зейделя. В отличие от традиционно применяемых в компьютерных моделях магнетронных приборов методов определения полей, обусловленных пространственным зарядом, предложенный метод позволяет учитывать цилиндрические границы электродов, в частности разрезную структуру цилиндрического анода, конструктивные неоднородности катода и т.д. Разработанная методика предназначена для применения в компьютерных моделях М-типа цилиндрической конструкции.*

Уравнение Пуассона, поля пространственного заряда, магнетронные приборы, компьютерные модели, численные методы, метод Зейделя, разрезная структура

**A.S. Yershov, A.A. Terentyev, V.B. Baiburin****NUMERICAL SOLUTION OF POISSON EQUATION FOR AREAS WITH NONLINEAR  
BOUNDARIES IN MODELS OF M-TYPE DEVICES**

*A solution of a cylindrical two-dimensional Poisson equation is obtained using Seidel method. Unlike traditionally used in computer models of magnetron devices methods for determining the space-charge fields, the proposed method allows to consider cylindrical boundaries of electrodes, in particular, the split structure of the anode, structural heterogeneity of cathode and etc. The developed technique is intended for application in computer models of M-type cylindrical constructions.*

Poisson equation, space-charge fields, M-type devices, computer models, numerical methods, Seidel method, split structure

Компьютерное моделирование сложных электровакуумных устройств, например, магнетронных СВЧ приборов, позволяет на стадии их проектирования исследовать протекающие в них физические процессы и проводить оптимизацию их конструктивных параметров. Естественно, с увеличением производительности вычислительных средств постоянно принимаются попытки учесть в моделях все большее число конструктивных параметров и физических эффектов, ранее находившихся за пределами математического описания.

В частности, насущной проблемой разработки строгих численных моделей магнетронных приборов является учет реальной конструкции прибора, например, разрезной структуры анодного блока, наличие неоднородностей катода и т.д. Математические модели, ис-

пользующие приближение «гладких» электродов [1, 2], не позволяют учитывать в моделях многие существенные свойства прибора.

Наиболее трудоемкой задачей является решение уравнения Пуассона и определение полей пространственного заряда с учетом сложной (разрезной) границы электродов. Конфигурация пространственного заряда, заданная в магнетронных моделях набором «крупных частиц», меняется на каждом временном шаге численного интегрирования основных уравнений модели. Это обстоятельство требует использования быстродействующих методов. Метод Хокни [3], традиционно принятый в компьютерном моделировании магнетронных приборов, и метод решения уравнения Пуассона, применим только для «гладких» границ пространства взаимодействия.

В [4] рассмотрены альтернативные численные методы решения уравнения Пуассона, в частности метод последовательных приближений (метод Зейделя), метод представления численного решения уравнения Пуассона с использованием обратной матрицы, которую можно вычислить один раз независимо от правой части и др.

Показано, что для компьютерных моделей магнетронов, в которых конфигурация электронного облака постепенно меняется, в целом образует однотипную структуру в виде электронной втулки и электронных спиц, наиболее целесообразно использовать метод Зейделя. Этот метод позволяет решать уравнение Пуассона с учетом произвольных границ рабочего пространства с приемлемым для современной вычислительной техники быстродействием.

Однако результаты и методика решения, развитые в [4], получены для уравнения Пуассона в ортогональных координатах и линейных (плоских) граничных поверхностях. Такое решение может быть использовано в приборах линейной (плоской) конструкции – планотроне, дематроне. Однако подавляющее большинство приборов М-типа имеют цилиндрическую конструкцию, и строгие численные модели магнетронных приборов основаны на уравнениях в цилиндрических координатах, что делает затруднительным непосредственное использование в них, полученных в [4] результатов.

В работе изложена методика численного решения уравнения Пуассона в цилиндрических координатах с учетом сложных границ рабочего пространства, а также результаты включения полученных методов и решений в компьютерную модель магнетрона.

Двумерное уравнение Пуассона в цилиндрических координатах имеет вид

$$r^{-1} \partial/\partial r (r \partial\Phi/\partial r) + r^{-2} \partial^2\Phi/\partial\varphi^2 = -\rho/\varepsilon_0, \quad (1)$$

с нулевыми граничными условиями на границе поверхностей электродов и условием замкнутости пространства по азимуту, где  $\rho = dQ/hrdrd\varphi$  – плотность заряда;  $Q$  – заряд в рабочем пространстве;  $h$  – высота прибора по оси  $Z$ .

Для решения данного уравнения перейдем к нормализованным координатам:  $x = \varphi$ ,  $y = \ln(r/r_c)$ , где  $r_c$  – радиус катода или любой «характерный» радиус.

Уравнение (1) в нормализованных координатах приобретает вид

$$\partial^2\Phi/\partial x^2 + \partial^2\Phi/\partial y^2 = -\rho'/\varepsilon_0, \quad (2)$$

где  $\rho' = dQ/hdydx = \rho r^2$  – нормализованная плотность.

Представим уравнение (2) в конечно-разностной форме:

$$(\Phi_{i+1,j} - 2\Phi_{i,j} + \Phi_{i-1,j})/\Delta x^2 + (\Phi_{i,j+1} - 2\Phi_{i,j} + \Phi_{i,j-1})/\Delta y^2 = -q_{i,j}/\varepsilon_0 h \Delta x \Delta y. \quad (3)$$

где  $q_{ij}$  – заряд в узле пространственной сетки;  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  – шаг сетки,  $i=1..n$ ,  $j=1..m$ ;  $n$ ,  $m$  – размерность сетки.

Суть метода Зейделя применительно к решению уравнения (3) заключается в следующем. Задается начальное значение  $\Phi_{i,j}^{(0)}$ , причем на каждом временном шаге моделирования в качестве начального значения выбирается значение потенциала  $\Phi_{i,j}$ , полученного на предыдущем шаге. Далее находятся следующие приближения  $\Phi_{i,j}^{(k)}$  в соответствии с итерационной формулой

$$\Phi_{i,j}^k = (\Delta y^2 (\Phi_{i+1,j}^{(k-1)} + \Phi_{i-1,j}^{(k-1)}) + \Delta x^2 (\Phi_{i,j+1}^{(k-1)} + \Phi_{i,j-1}^{(k-1)}) + \Delta x \Delta y q_{i,j} / \varepsilon_0 h) / (2(\Delta x^2 + \Delta y^2)). \quad (4)$$

Итерационная процедура повторяется до тех пор, пока отличие  $\Phi_{i,j}^{(k)}$  от  $\Phi_{i,j}^{(k-1)}$  станет меньше заданной погрешности.



Анализ быстродействия и сходимости метода, точности расчета и сравнение с другими альтернативными методами проводились на примере конфигураций электронного облака и границ рабочего пространства, показанных на рис. 1. При этом конфигурация на рис. 1 а использовалась для сравнения метода Зейделя с методом «обратной матрицы», конфигурация на рис. 1 б – для сравнения с методом Хокни, а конфигурация на рис. 1 в – с аналитическим решением.

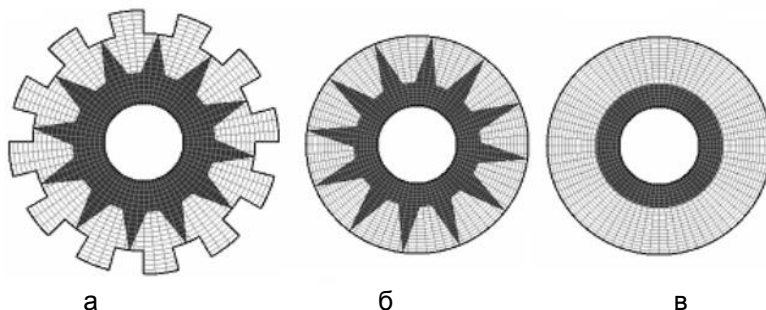


Рис. 1. Структура области и конфигурация электронного облака:  
а – с учетом разрезной структуры анодного блока;  
б – без учета разрезной структуры анодного блока;  
в – в виде электронной втулки

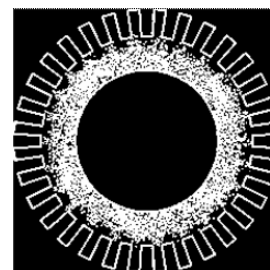


Рис. 2. Конфигурация электронного облака магнетрона мм-диапазона с учетом разрезной структуры анодного блока на все виды полей

Расчеты показали, что при числе узлов пространственной сетки порядка  $n \cdot m = 512 \cdot 16$  и выше, все методы обеспечивают достаточную точность (отличие друг от друга и от аналитического решения не превышает 5%). По быстродействию на первом месте находится метод Хокни (3 с, при количестве узлов 8000), на втором – метод Зейделя (6 с), на третьем – метод «обратных матриц» (25 с). Учитывая, что метод Зейделя по быстродействию от метода Хокни отличается не более чем в 2 раза, но в отличие от него позволяет учитывать сложные граничные условия реальных магнетронных приборов, его следует считать наиболее перспективным.

На рис. 2 приведена конфигурация электронного облака магнетрона мм-диапазона с учетом влияния разрезной структуры анодного блока на все виды полей электростатического, ВЧ полей и полей пространственного заряда.

Такие приборы работают при анодных напряжениях, близких к критическим, а облако пространственного заряда занимает почти все пространство взаимодействия. Для корректного моделирования подобных приборов крайне важно учитывать влияние «краевых эффектов» на поля пространственного заряда, так как граница электронной втулки близка к границе разрезной структуры.

Описанный выше подход к решению уравнения Пуассона может быть полезен и при моделировании магнетронных усилителей с пространством дрейфа, магнетронов с неоднородным катодом, а также в трехмерных моделях [5, 6], в которых граничные условия граничные условия на электродах (по оси Z) носят принципиально неоднородный характер.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Романов П.В. О решении уравнения Пуассона для области взаимодействия электронных приборов / П.В. Романов, А.С. Рошаль // Изв. вузов. Радиофизика. 1971. Т. 14, №7. С. 1097-1105.
2. Моносов Г.Г. К решению уравнения Пуассона для пространства взаимодействия цилиндрического магнетрона на ЭЦВМ методом Фурье / Г.Г. Моносов // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1970. Вып. 3. С. 150-154.
3. Хокни Р. Численное моделирование методом крупных частиц / Р. Хокни, Дж. Иствуд / пер. с англ. под ред. Р.З. Сагдеева и В.И. Шевченко. М.: Мир, 1987. 640 с.

4. Терентьев А.А. Расчет полей пространственного заряда при компьютерном моделировании приборов М-типа / А.А. Терентьев, А.В. Ляшенко, А.С. Ершов // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2009. Вып. 6. С. 77-85

5. Расчет полей пространственного заряда при трехмерном моделировании приборов М-типа / В.Б. Байбурин, А.А. Терентьев, М.В. Гаврилов и др. // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45, № 8.

6. Трехмерные цилиндрические уравнения движения электронов в неоднородных скрещенных полях / В.Б. Байбурин, А.А. Терентьев, М.В. Гаврилов, А.Б. Поваров // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45, № 4. С. 492-498.

**Ершов Алексей Сергеевич** –

аспирант кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

**Терентьев Александр Александрович** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

**Байбурин Вил Бариевич** –

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 539.3

**Н.В. Овчинникова, Ю.В. Чеботаревский**

### **К РАСЧЕТУ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА, КОНТАКТИРУЮЩЕГО С АБСОЛЮТНО ЖЕСТКИМ ИНДЕНТОРОМ**

*Сформулирован упрощенный инженерный способ расчета напряженно-деформированного состояния упругопластической среды, контактирующей с абсолютно жестким индентором. В его основе находится замена реального контактного воздействия индентора на материал среды действием эквивалентной ему изменяющейся по определенному закону распределенной нагрузки. Обоснованы правомерность и эффективность предлагаемого способа.*

Контактная задача, пластическая деформация, нелинейные колебания индентора, распределенная нагрузка, напряженное состояние

**N.V. Ovchinnikova, U.V. Chebotarevsky**

### **ONE COMPUTATIONAL METHOD FOR STRAIN-STRESS ANALYSIS OF ELASTO- PLASTIC HALF-SPACE IN CONTACT WITH RIGID INDENTER**

*Simplified engineering method for strain-stress analysis of elasto-plastic half-space in contact with rigid indenter is suggested. It based on substitution of*

*real contact interaction between indenter and half-space for equivalent distributed load applied to contact surface of the half-space. Suggested method is proved to be appropriate and effective.*

Contact problem, plastic strain, nonlinear oscillations of the indenter, distributed load, deflected mode

В настоящее время активно осваиваются различные технологии повышения эксплуатационных характеристик конструктивных элементов машин и механизмов. Одной из них является упрочнение поверхности детали пластическим деформированием воздействием колеблющегося с ультразвуковой частотой рабочего инструмента. Применение ультразвука позволяет существенно повысить качество обрабатываемой поверхности и обеспечить высокую износостойчивость деталей. Для оптимизации технологических параметров механической обработки материалов с использованием ультразвукового воздействия и повышения её эффективности весьма актуальным представляется исследование напряженно-деформированного состояния обрабатываемых объектов при комбинированном силовом и ультразвуковом воздействии. Исследование механики таких процессов в большинстве случаев сводится к решению контактных задач о взаимодействии обрабатываемой среды с жестким индентором, к которому приложено силовое воздействие в виде [1]:

$$F(t) = F_0 + F_v \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $F_0$  – постоянная составляющая приложенной к индентору нагрузки, обеспечивающая необходимый рабочий натяг между ним и обрабатываемой средой;  $F_v$  – амплитуда переменной составляющей, колеблющейся с ультразвуковой круговой частотой

$\omega$ , причем  $F_v$  существенно меньше  $F_0$ .

Из-за локальности исследуемого механического процесса представим обрабатываемый объект в виде упругопластического полупространства, к поверхности которого прикладывается жесткий индентор со сферической рабочей поверхностью. Введем в рассмотрение цилиндрическую систему координат  $Or\theta z$ , совместив её начало с точкой первоначального соприкосновения индентора и полупространства и направив ось  $Oz$  по нормали в глубь пространства (рис. 1).

Будем считать, что физико-механические свойства материала среды отвечают модели изотропно-кинематического упрочнения [2], а жесткость индентора такова, что формоизменения его рабочей поверхности при взаимодействии со средой не происходит.

Искривлением поверхности полупространства в процессе деформирования также будем пренебрегать. При сформулированных выше условиях в предположении, что к поверхности полупространства не приложено более никаких сил и индентор совершает только поступательные перемещения в направлении оси  $z$ , исследование напряженно-деформированного состояния среды может быть сведено к решению следующей осесимметричной контактной краевой задачи:

1) уравнения движения

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r}(r\sigma_r) - \sigma_\theta + r \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= \rho \frac{d^2 u_r}{dt^2}, \\ r \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r}(r\sigma_r) &= \rho \frac{d^2 u_z}{dt^2}; \end{aligned} \quad (2)$$

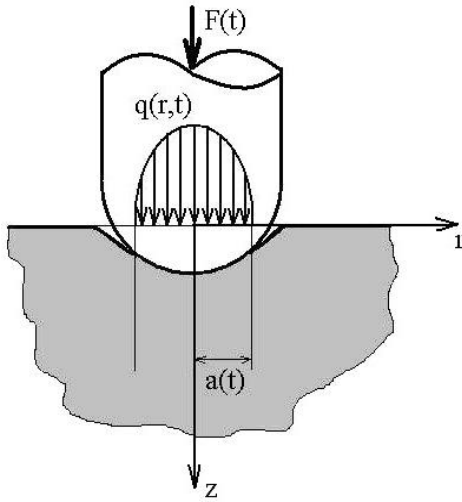
2) соотношения Коши

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u_r}{r}, \quad \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right); \quad (3)$$

3) физические соотношения

$$\varepsilon_{ii} = \varepsilon_{ii}^{el} + \varepsilon_{ii}^{pl} \quad (i = r, \theta, z), \quad \varepsilon_{rz} = \varepsilon_{rz}^{el} + \varepsilon_{rz}^{pl}; \quad (4)$$

а) для упругих составляющих компонент деформации



$$\varepsilon_{rr}^{el} = \frac{1}{E} [\sigma_{rr} - \nu(\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz})],$$

$$\varepsilon_{\theta\theta}^{el} = \frac{1}{E} [\sigma_{\theta\theta} - \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{zz})];$$

$$\varepsilon_{zz}^{el} = [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{rr})]/E, \quad \varepsilon_{rz}^{el} = (1 + \nu)\sigma_{rz}/E; \quad (5)$$

б) для пластических составляющих компонент деформации

$$\dot{\varepsilon}_{ii}^{pl} = \dot{\varepsilon}_u^{pl} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ii}} \quad (i = r, \theta, z), \quad \dot{\varepsilon}_{rz}^{pl} = \dot{\varepsilon}_u^{pl} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{rz}}, \quad (6)$$

$$\Phi = f(\sigma, \alpha) - \sigma^0 = 0, \quad (7)$$

$$\sigma^0 = \sigma_0 + Q_\infty \left( 1 - e^{-\tilde{b} \dot{\varepsilon}_u^{pl}} \right),$$

Рис. 1. Схема процесса ультразвукового упрочнения поверхности

$$f(\sigma, \alpha) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\tilde{\sigma}_{rr} - \tilde{\sigma}_{\theta\theta})^2 + (\tilde{\sigma}_{\theta\theta} - \tilde{\sigma}_{zz})^2 + (\tilde{\sigma}_{zz} - \tilde{\sigma}_{rr})^2 + 6\tilde{\sigma}_{rz}^2}$$

$$\tilde{\sigma}_{ii} = \sigma_{ii} - \alpha_{ii}, \quad \dot{\alpha}_{ii} = C(\sigma_{ii} - \alpha_{ii}) \dot{\varepsilon}_u^{pl} / \sigma^0 - \gamma \alpha_{ii} \dot{\varepsilon}_u^{pl}, \quad (i = r, \theta, z), \quad (8)$$

$$\tilde{\sigma}_{rz} = \sigma_{rz} - \alpha_{rz}, \quad \dot{\alpha}_{rz} = C(\sigma_{rz} - \alpha_{rz}) \dot{\varepsilon}_u^{pl} / \sigma^0 - \gamma \alpha_{rz} \dot{\varepsilon}_u^{pl};$$

4) граничные условия:

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{zz} = \sigma_{rz} = 0, \quad \text{при } r, z \rightarrow \infty,$$

$$\sigma_{rz}|_{z=0} = 0 \quad \text{при } z = 0,$$

$$\sigma_{zz} = 0 \quad \text{при } z = 0 \text{ и } r > a,$$

$$\sigma_{zz} = p(r, t) \quad \text{при } z = 0 \text{ и } r \leq a, \quad \text{где } \int_0^a p(r, t) dr = F(t). \quad (9)$$

К записанным выше соотношениям (7) для точек, лежащих на возможной линии раздела контактирующих поверхностей, необходимо добавить граничные условия, сформулированные в виде неравенств:

$$u_z^1 - u_z^2 - \delta(r) \leq 0, \quad \sigma_{zz} \leq 0, \quad (u_z^1 - u_z^2 - \delta(r)) \sigma_{zz} = 0 \quad \text{при } z = 0 \quad (10)$$

В формулах (2)-(11) приняты следующие обозначения:  $\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{zz}, \sigma_{rz}$  и  $\varepsilon_{rr}, \varepsilon_{\theta\theta}, \varepsilon_{zz}, \varepsilon_{rz}$  – компоненты тензора напряжений и тензора деформаций соответственно;  $\alpha_{rr}, \alpha_{\theta\theta}, \alpha_{zz}, \alpha_{rz}$  – компоненты тензора микронапряжений;  $u_r, u_z$  – компоненты вектора перемещений в направлении осей  $r$  и  $z$  с индексом «1» и «2» точек полупространства и индентора соответственно;  $\delta(r)$  – первоначальный зазор между соответствующей парой точек, лежащих на поверхностях полупространства и индентора;  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\rho$  – плотность материала;  $\sigma_0$  и  $Q_\infty$ ,  $\tilde{b}$ ,  $C$ ,  $\gamma$  – предел текучести материала среды и его физические параметры, определяемые экспериментальным путем. Интенсивность скоростей пластических деформаций определяется соотношением

$$\dot{\varepsilon}_u^{pl} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_{rr}^{pl} - \dot{\varepsilon}_{\theta\theta}^{pl})^2 + (\dot{\varepsilon}_{\theta\theta}^{pl} - \dot{\varepsilon}_{zz}^{pl})^2 + (\dot{\varepsilon}_{zz}^{pl} - \dot{\varepsilon}_{rr}^{pl})^2 + \frac{3}{2} (\dot{\varepsilon}_{rz}^{pl})^2}, \quad (11)$$

Сформулированная выше задача является весьма сложной поэтому, её аналитическое решение из-за математических трудностей не представляется возможным. При численном её

решении с применением современных конечно-элементных программных комплексов типа ABAQUS, ANSYS [2, 3] из-за специфики поведения материала при высокочастотных механических воздействиях требуются огромные вычислительные мощности и даже при их наличии результат не всегда достижим. Поэтому возникает необходимость разработки упрощенного инженерного способа исследования, позволяющего с существенно меньшими затратами определять напряженно-деформированное состояние обрабатываемого объекта и при необходимости оперативно корректировать параметры технологического процесса.

Ниже предлагается инженерный способ расчета напряженного деформированного состояния среды, в основе которого содержится физико-математическая модель исследуемого процесса, основанная на замене реального контактного воздействия рабочего инструмента на материал обрабатываемой среды, действием эквивалентной ему, распределенной по определенному закону нагрузки. Из-за принятых выше допущений предлагается считать индентор абсолютно жестким и его движение рассматривать отдельно от движения упругопластической среды, заменяя её действие на индентор равнодействующей сил контактного взаимодействия, подчиняющейся закону [4]:

$$N = c_{np} w^{3/2}, \quad (12)$$

где  $c_{np} = 4\sqrt{RE}/[3(1-\nu^2)]$  – приведенный коэффициент жесткости материала среды;  $E$  – его модуль упругости при отсутствии пластических деформаций на поверхности контакта или секущий модуль при их наличии;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $R$  – радиус кривизны сферической рабочей поверхности индентора; а  $w = w(t)$  – перемещение её центральной точки.

Так как в соответствии с условиями поставленной задачи индентор может совершать только поступательные перемещения, для определения закона его движения достаточно исследовать движения любой его точки. Примем за такую точку упомянутую выше центральную точку его рабочей поверхности. Тогда с учетом сформулированных выше допущений и в предположении, что рассеяние энергии при движении индентора происходит за счет механизма внутреннего трения в контактирующем с ним материале, исследование его движения сводится к решению следующей нелинейной краевой задачи:

$$m\ddot{w} + b\dot{w} + c_{np} w^{3/2} = F(t), \quad w = 0, \quad \dot{w} = 0 \quad \text{при } t = 0, \quad (13)$$

где  $b = \sqrt{Rw_0} E\psi / [\pi\omega(1-\nu^2)]$  – приведенный коэффициент диссипации энергии;  $\psi$  – коэффициент поглощения энергии обрабатываемой среды,  $w_0$  – некоторое статическое смещение, которое получил бы индентор под действием постоянной составляющей приложенной к нему силы  $F_0$ . Учет рассеяния энергии в обрабатываемой среде проведен на основе условной вязкоупругой схемы [5], эквивалентной в отношении поглощающих свойств модели материала с внутренним трением.

Данная задача является существенно нелинейной. Поэтому фактическое существование ее асимптотически устойчивых периодических решений подтверждено с помощью теоремы Ляпунова [6] на основе анализа корней характеристического уравнения соответствующей (13) линеаризованной задачи:  $\lambda^2 + b\lambda/m + c_1/m = 0$ , полученного при следующих ограничениях  $0 \leq w \leq 2w_0$ . Так как коэффициент  $b$  по физическому смыслу рассматриваемой задачи всегда положителен, то вещественные части корней приведенного выше характеристического уравнения всегда будут отрицательны, что соответствует условию асимптотической устойчивости.

Накладываемые ограничения по существу определяют границы области устойчивости движения рассматриваемой механической системы «индентор – среда» и имеют простой физический смысл. А именно при значениях перемещения индентора, выходящих за пределы указанного выше интервала, происходит его отрыв от контактирующей с ним поверхности, что противоречит условиям применимости сформулированной выше задачи о движении индентора (13) из-за наличия в левой части уравнения его движения слагаемого, содержащего перемещение в дробной степени с четным знаменателем.

Численное решение поставленной задачи получено методом Рунге-Кутты 4-го порядка. На основе анализа результатов расчета обнаружено существование явления многопикового резонанса, принципиально невозможного в линеаризованной системе. В качестве примера на рис. 2 показана зависимость наибольших отклонений центра масс индентора от начального положения в установившемся вынужденном колебательном движении от частоты переменной составляющей возмущающей силы (1), при следующих значениях параметров:

$$E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}, \nu = 0,3, m = 0,018 \text{ кг}, F_0 = 19,62 \text{ Н}, R_{xp} = 0,07 \text{ м}, F_v = 0,08F_0 \quad (14)$$

Приведенная выше зависимость характерна скачкообразным изменением амплитуды колебаний индентора при плавном приближении частоты к резонансному диапазону.

Согласно предлагаемой расчетной модели найденные значения перемещения центральной точки рабочей поверхности индентора  $w(t)$  используются в каждый момент времени в качестве исходных данных для определения радиуса пятна контакта  $a(t)$  и интенсивности распределенной по нему нагрузки  $q(r,t)$  по формулам [7]:

$$a(t) = \sqrt{R \cdot w(t)}, \quad q(r,t) = 2E\sqrt{w(t)}\sqrt{1-r^2/R^2} / [\pi\sqrt{R}(1-\nu^2)]$$

Правомерность замены решения контактной задачи в классической постановке (2) - (10) задачей о напряженно-деформированном состоянии среды под действием эквивалентной нагрузки, обосновывается проведением сравнительного анализа результатов решений, полученных разными способами, а также совпадением результатов с аналитическим решением контактной упругой задачи [4]. Исследование проводилось с применением программного комплекса ABAQUS в статической и квазистатической постановках при условии, что физико-механические свойства материала среды отвечают приведенной выше модели изотропно – кинематического упрочнения (6) - (8).

При этом при решении задач, как в классической постановке, так и на основе расчетной схемы с эквивалентной нагрузкой рассматривались только те условия нагружения, при которых пластическая зона не выходит на поверхность обрабатываемой среды.

В качестве примера на рис. 3 и 4 показаны зависимости интенсивности напряжений от осевой координаты  $z$ , полученные двумя способами при нагружении рабочего инструмента силой (1) для случаев  $F_v = 0$  (рис. 3) и  $F_v = 0,08F_0$  (рис. 4). Вычисления выполнены для приведенных выше параметров (17) при следующих значениях констант материала среды:

$$\sigma_0 = 2 \cdot 10^8 \text{ Па}, Q_\infty = 2 \cdot 10^9 \text{ Па}, \tilde{b} = 0,26, C = 2,55 \cdot 10^{10} \text{ Па}, \gamma = 81. \quad (14)$$

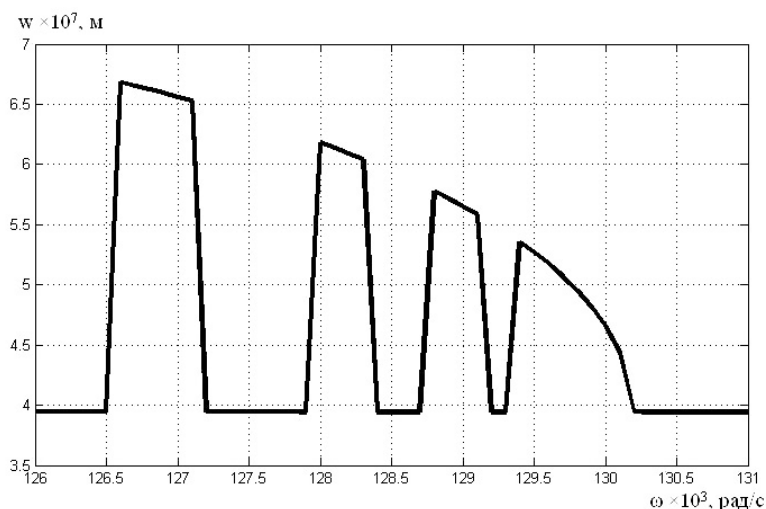


Рис. 2. График поведения наибольших отклонений центра масс индентора от начального положения в зависимости от частоты переменной составляющей возмущающей силы в установившемся движении

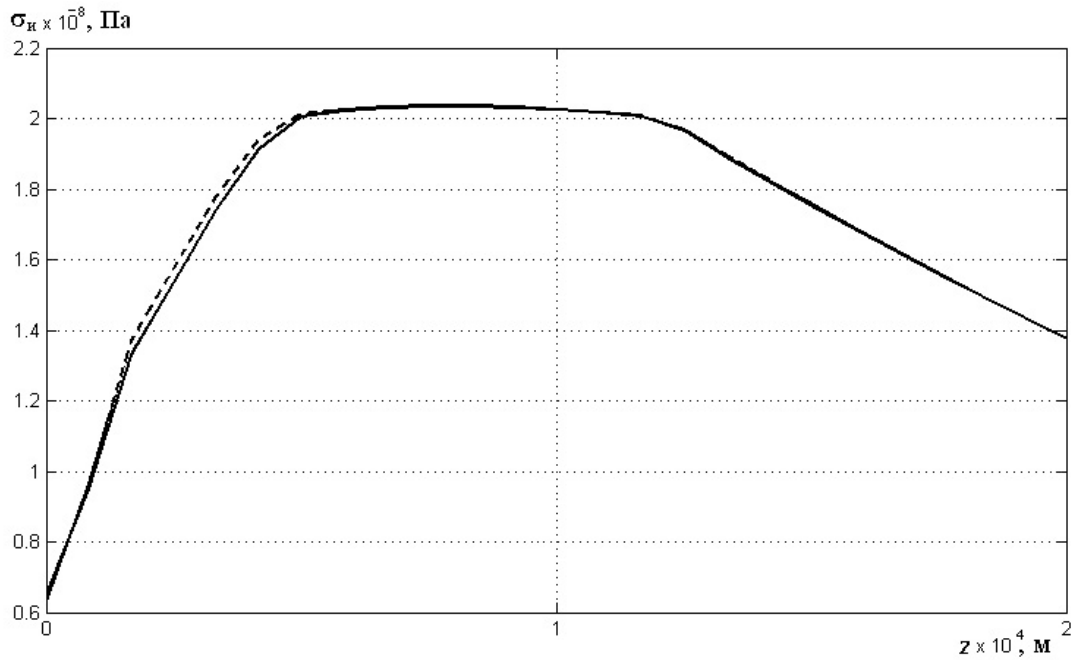


Рис. 3. Зависимость интенсивности напряжений от осевой координаты  $z$  при  $F_v = 0$

На рис. 3, 4 сплошная линия соответствует решению контактной задачи в классической постановке, а пунктирная линия – решению эквивалентной ей задачи с распределенной нагрузкой, определяемой по результатам исследования движения индентора как абсолютно твердого тела. Приведенные графики показывают хорошее совпадение результатов, полученных двумя способами.

Наибольшее расхождение результатов расчета в случае статического нагружения наблюдается в центральной точке контакта и не превышает 3%.

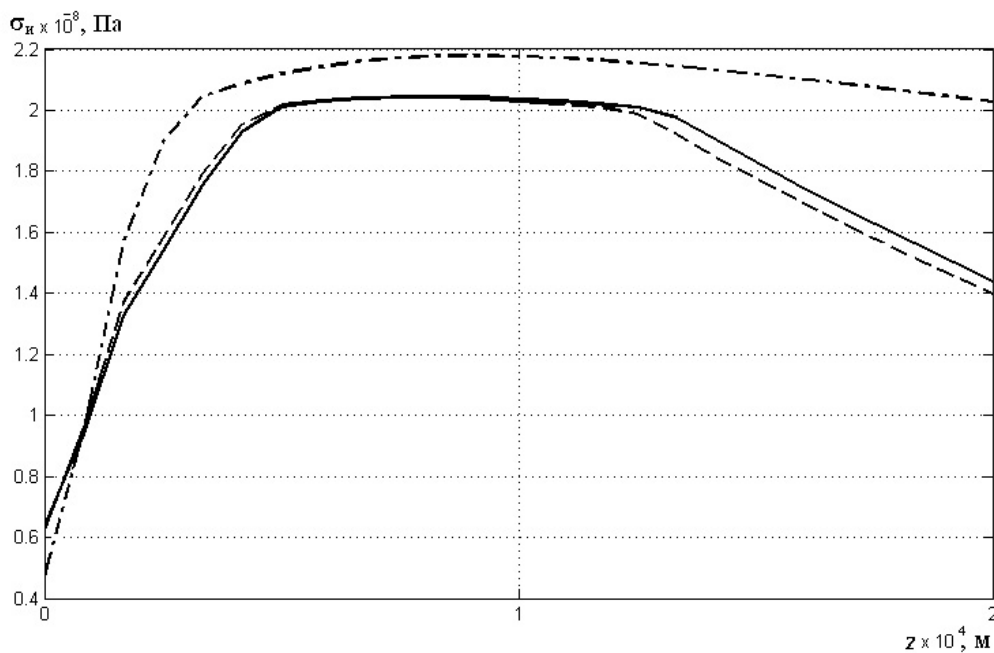


Рис. 4. Зависимости интенсивности напряжений от осевой координаты  $z$  при  $F_v = 0,08F_0$

В случае нагружения силой с переменной составляющей наибольшее расхождение результатов обнаружено в упругой зоне на участке, находящемся непосредственно перед областью пластических деформаций. При этом погрешность расчета на базе эквивалентной модели находится в пределах 3,3%. Сопоставление зависимостей, показанных на двух рисунках, позволяет сделать вывод о том, что при отсутствии резонансных режимов ( $\omega = 23,885$  кГц) ультразвуковое воздействие практически не оказывает влияния на характер напряженно-деформированного состояния среды. На рис. 4 штрих-пунктиром показан график поведения интенсивности напряжений вдоль оси  $oz$  для случая резонансных колебаний индентора с частотой 20,223 кГц, построенный по результатам расчета на базе предложенной выше модели. Из него следует, что при резонансе характер поведения интенсивности напряжений изменяется как качественно, так и количественно.

Приведенные выше примеры подтверждают правомерность и эффективность применения предложенного инженерного способа расчета напряженно – деформированного состояния упругопластической среды, контактирующей с абсолютно жестким индентором, за счет значительного уменьшения трудоемкости и времени вычислительного процесса, а также позволяют предположить возможность управления процессом формирования упрочненных слоев в обрабатываемом материале подбором соответствующих технологических параметров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинникова Н.В. Модельная задача для исследования процессов поверхностного упрочнения пластическим деформированием с применением ультразвуковых воздействий / Н.В. Овчинникова, Д.Г. Павлов, Ю.В. Чеботаревский // Вестник СГТУ. 2007. №4(28). Вып. 1. С.14-18.
2. ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.4 Hibbitt: Karlsson & Sorensen, Inc. USA. 2002.
3. Басов К. А. ANSYS. Справочник пользователя / К. Басов. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.
4. Динник А.Н. Избранные труды / А.Н. Динник. Т.1. Киев: Изд-во АН Укр. ССР, 1952. 152 с.
5. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем / Я.Г. Пановко. М.: Физматгиз, 1960. 193 с.
6. Красовский А.А. Основы автоматики и технической кибернетики / А.А. Красовский, Г.С. Поспелов. Л.: Госэнергоиздат, 1962. 600 с.
7. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. М.: Высшая школа, 1968. 512 с.

**Овчинникова Наталья Владимировна** –

ассистент кафедры «Теоретическая механика» Саратовского государственного технического университета

**Чеботаревский Юрий Викторович** –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*



УДК 535.012.2

**О.В. Ушакова, Д.А. Зимняков, К.И. Кириллов****ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФFUЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА ОТ СРЕДЫ С ВЫРАЖЕННОЙ СТРУКТУРНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ**

*Для исследования пространственных распределений интенсивности излучения, диффузно отраженного от многократно рассеивающей среды с анизотропией коэффициента рассеяния использовался метод Монте-Карло.*

Моделирование Монте-Карло, многократное рассеяние, распространение света, анизотропные среды

**O.V. Ushakova, D. A. Zimnyakov, K.I. Kirillov****STUDY OF THE LIGHT DIFFUSE REFLECTANCE FROM A MEDIUM WITH THE EXPRESSED STRUCTURAL ANISOTROPY**

*Monte-Carlo technique is applied to study the intensity profiles of diffuse light reflected from a layered multiple scattering medium with the expressed macroscopic anisotropy of underlying layers.*

Monte-Carlo simulation, multiple scattering, light transport, anisotropic media

Анализ структуры поверхностных или глубинных слоев многослойных биологических тканей с выраженной макроскопической анизотропией оптических свойств является одним из перспективных направлений в оптической диагностике.

Требуемая на практике надежная послойная дозиметрия лазерного излучения внутри биоткани, проблемы оптической диффузной томографии и спектроскопии биообъектов определяют необходимость развития методов решения задач теории переноса излучения для сред с произвольной конфигурацией и любыми граничными условиями. Для решения таких задач перспективен метод Монте-Карло, основанный на численном моделировании транспорта фотонов в рассеивающей среде. Для учета зависимости оптических параметров окружающей среды от направления распространения зондирующего излучения в работе модифицирован стандартный метод Монте-Карло.

Анизотропия оптических параметров описана с помощью  $(3 \times 3)$  тензоров коэффициентов рассеяния и поглощения, которым соответствуют два уравнения зависимости коэффициентов поглощения и рассеяния от направления распространения фотонов:

$$\mu'_{ax}x^2 + \mu'_{ay}y^2 + \mu'_{az}z^2 = \mu'_a(x, y, z), \quad (1)$$

$$\mu'_{sx}x^2 + \mu'_{sy}y^2 + \mu'_{sz}z^2 = \mu'_s(x, y, z), \quad (2)$$

где  $x, y, z$  – направляющие косинусы, определяющие распространение «фотона» от одного рассеивающего центра к другому,  $\mu'_{si}, \mu'_{ai}$  – транспортные коэффициенты рассеяния и поглощения, определяемые для соответствующих базовых направлений выбранной системы координат (рис. 1). Эта система координат определена анизотропией рассматриваемой рассеивающей системы (например, ансамблем коллагеновых волокон в слое дермы при распространении света в коже). В работе рассмотрен частный случай, когда система является «одноосной» и ось эллипсоида коэффициентов рассеяния ориентирована параллельно поверхности среды ( $\mu'_{xx} = \mu'_{zz} \neq \mu'_{yy}$ ,  $\mu'_{ax} = \mu'_{ay} = \mu'_{az}$ ). С учетом данного ограничения и с использованием

выражения (2) для каждого акта рассеяния рассчитывалась длина распространения фотона в среде до следующего рассеивающего центра, и учитывалось соответствующее изменение в «весе» фотона. Индикатриса однократного рассеяния, используемая при моделировании значений угла рассеяния для каждого акта рассеяния, моделировалась функцией Хенши-Гринштейна [1-3]. Количество вводимых в среду фотонов равнялось  $N_{in} = 10^6$ .

Для каждого фотона, вышедшего из среды, фиксировались значения длины пути и координаты точки выхода из среды. При определении числа детектируемых фотонов учитывались ограничения на угол между направлением распространения фотона, выходящего из среды, и нормалью к поверхности, которые обусловлены значением угловой апертуры детектора (ПЗС-камеры).

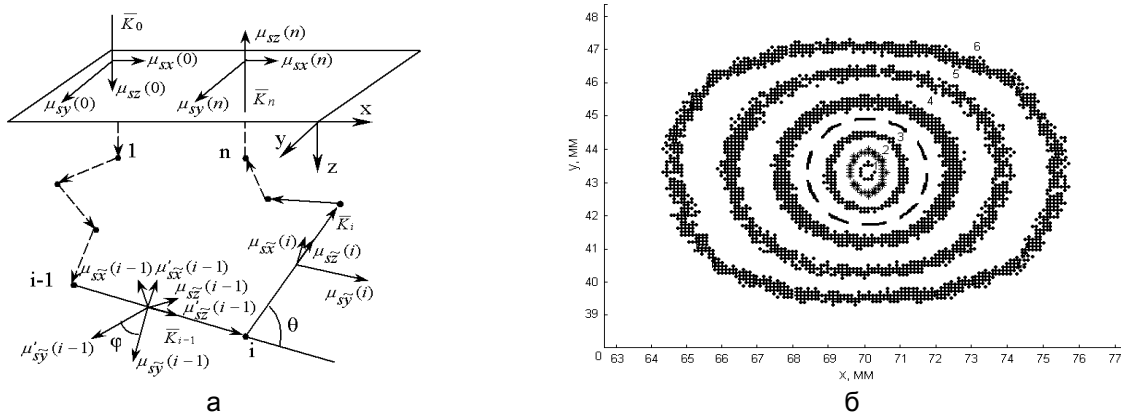


Рис. 1. Результаты моделирования методом Монте-Карло: а – схема процедуры моделирования с учетом анизотропии рассеяния (для анизотропии поглощения выглядит аналогичным образом); б – контуры равных интенсивностей обратно рассеянного излучения, оптические параметры моделируемой среды соответствуют оптическим параметрам для деминерализованной костной ткани  $n=1.4, g=0.7, \mu'_{sx,z}=4 \text{ см}^{-1}, \mu'_y=11 \text{ см}^{-1}, \mu'_a=0.000434 \text{ см}^{-1}, \mu'_{sx,z}/\mu'_y=0.36$  [4].  
 1 –  $0.1 < \rho < 0.15$ ; 2 –  $0.05 < \rho < 0.06$ ; 3 –  $0.02 < \rho < 0.025$ ; 4 –  $0.0067 < \rho < 0.01$ ,  
 5 –  $0.003 < \rho < 0.004$ ; 6 –  $0.0008 < \rho < 0.001$

На рис. 1 б представлено семейство профилей равной интенсивности, соответствующих различным значениям нормированной плотности потока диффузно отраженного излучения  $\rho$  ( $\rho = N_{out}/N_{in}$ , где  $N_{out}$  – фотоны, регистрируемые детектором с единичной площади). На рис. 2б видны различия в ориентациях эллипсов равной интенсивности в ближней зоне, где обратно рассеянное излучение формируется в результате значительного вклада мало-кратно рассеянных составляющих, и в дальней зоне (на расстояниях, существенно превышающих характерное значение транспортной длины для зондируемой среды). Наблюдаемые изменения формы и ориентации профилей равной интенсивности с увеличением расстояния между источником и детектором, полученные моделированием переноса зондирующего излучения в среде с выраженной анизотропией рассеяния, подобны изменениям пространственных распределений интенсивности обратно рассеянного излучения с поверхности исследуемого образца с фибриллярной структурой (демнерализованная кость, кожа), которые экспериментально наблюдались в [4, 5].

На рис. 2 а представлены пространственные распределения интенсивности обратно рассеянного излучения для двух ортогональных направлений, совпадающих с главными осями моделируемой среды, в зависимости от расстояния  $r$  между зонами детектирования и ввода излучения в среду. Пересечение радиальных распределений интенсивности обратно рассеянного света с поверхности среды в направлении большей полуоси эллипса равной интенсивности и в ортогональном направлении свидетельствует о том, что на некотором расстоянии  $\xi$  от точки ввода излучения в среду эксцентриситет эллипса равной интенсивности равен 0 (эллиптическое распределение вырождается в круговое). На рис. 2б приведена зави-

симось  $\xi$  от отношения  $\mu'_{sx,z}$  к  $\mu'_y$ , полученная в результате Монте-Карло моделирования. Расстояние  $\xi$  от зоны ввода излучения до зоны детектирования, при котором эксцентриситет эллипса равной интенсивности равен 0, приближенно равно значению  $\sqrt{l_{II}^* l_{\perp}^*} + \delta$ , где  $\delta = 0.01$  мм,  $l_{\perp}^*$  и  $l_{II}^*$  – соответственно значение транспортной длины при распространении излучения вдоль выделенной оси и перпендикулярно ей (рис. 2 б).

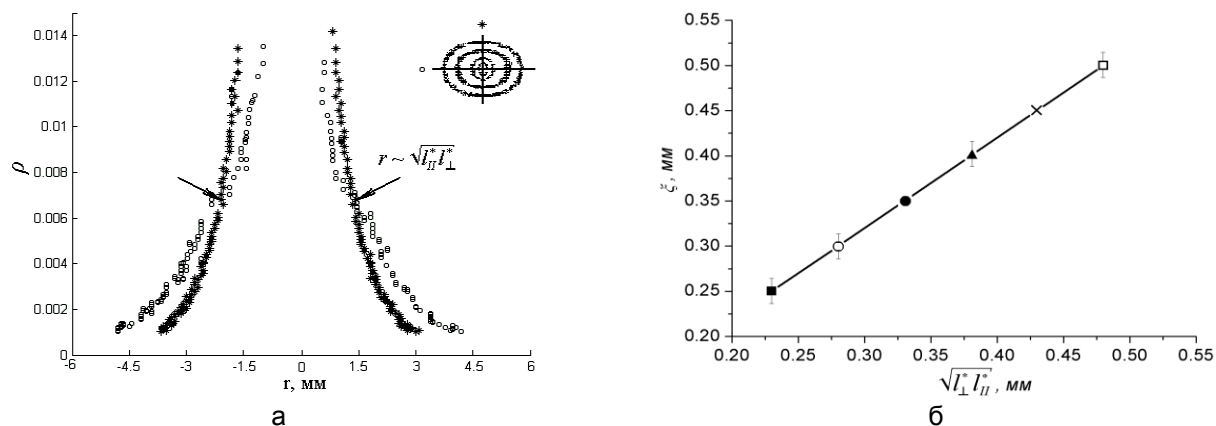


Рис. 2. а – радиальные распределения интенсивности диффузно отраженного излучения для анизотропной многократно рассеивающей среды ( $n = 1.4$ ,  $g = 0.7$ ;  $\mu'_{sx,z} = 4 \text{ см}^{-1}$ ;  $\mu'_y = 11 \text{ см}^{-1}$ ;  $\mu'_a = 0.000434 \text{ см}^{-1}$ ;  $\mu'_{sx,z} / \mu'_y = 0.36$ ); б – график зависимости  $\xi$  от  $\sqrt{l_{II}^* l_{\perp}^*}$  при  $\mu'_{sx,z} / \mu'_y = 0.36$  (■ –  $\mu'_{sx,z} = 25 \text{ см}^{-1}$ ;  $\mu'_{sy} = 64 \text{ см}^{-1}$ ; ○ –  $\mu'_{sx,z} = 20 \text{ см}^{-1}$ ;  $\mu'_{sy} = 55 \text{ см}^{-1}$ ; ● –  $\mu'_{sx,z} = 17 \text{ см}^{-1}$ ;  $\mu'_{sy} = 48 \text{ см}^{-1}$ ; ▲ –  $\mu'_{sx,z} = 15 \text{ см}^{-1}$ ;  $\mu'_{sy} = 42 \text{ см}^{-1}$ ; × –  $\mu'_{sx,z} = 13 \text{ см}^{-1}$ ;  $\mu'_{sy} = 37 \text{ см}^{-1}$ ; □ –  $\mu'_{sx,z} = 12 \text{ см}^{-1}$ ;  $\mu'_{sy} = 33 \text{ см}^{-1}$ )

Полученные в работе результаты указывают, что в случае распространения излучения от локализованного источника в анизотропной многократно рассеивающей «одноосной» среде с малым поглощением и осью, параллельной поверхности, существует характерное расстояние от источника  $\xi$ , определяемое значением  $\sqrt{l_{\perp}^* l_{II}^*}$  ( $l_{\perp}^*$  и  $l_{II}^*$  – значения транспортной длины при распространении излучения вдоль оси и перпендикулярно ей), для которого эксцентриситет контура равной интенсивности обращается в 0. Значение  $\xi$  и эксцентриситета контуров равной интенсивности для расстояний от источника, существенно превышающих  $\xi$ , а также ориентация большой оси контуров описывают транспортные свойства среды в диффузионном приближении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Medical optical tomography: functional imaging and monitoring / G. Muller, B. Chance, R. Alfano et al. // Bellingham, Proc. SPIE. 1993. V. IS11. P. 87- 20.
2. Yodh A. Diffusing photons in turbid media / A. Yodh, B. Tromberg, E. Sevick-Muraca et al. // J. Opt. Soc. Am. A. 1997. V. A14. P. 136-141.
3. Jutamulia S. Optical engineering in ophthalmology / S. Jutamulia, T. Asakura // Opt. Eng. 1995. V. 34. N 3. P. 640-650.
4. Intensity profiles of linearly polarized light backscattered from skin and tissue-like phantoms / A. Sviridov, V. Chernomordik, A. Russo et al. // Journal of Biomedical Optics. 2005. V.10. N1. P. 014012-1-014012-9.
5. Light propagation in dentin: influence of microstructure on anisotropy / A. Kienle, F.K. Forster, R. Diebolder et al. // Phys. Med. Biol. 2003. V. 48. P. 7-14.

**Ушакова Ольга Валерьевна** –

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Зимняков Дмитрий Александрович** –

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Общая физика» Саратовского государственного технического университета

**Кириллов Кирилл Игоревич** –

аспирант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 537.533.35

**В.В. Галушка, Д.И. Биленко**

### **СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ АРТЕФАКТОВ ПРИ РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНОМ МИКРОАНАЛИЗЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ**

*Электронный микроскоп, оснащенный системой рентгеноспектрального микроанализа, позволяет проводить локальный химический элементный анализ. Однако использование в качестве закрепляющего материала проводящих полимеров и адсорбция поверхностью углеводородов приводят к артефактам. Результаты исследований указывают на возможности существенного снижения влияния артефактов на результаты качественного и количественного определения состава при рентгеноспектральном микроанализе в электронной микроскопии.*

Электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, артефакты

**V.V. Galushka, D.I. Bilenko**

### **DECREASE IN INFLUENCE OF ARTEFACTS AT ENERGY DISPERSIVE X-RAY ANALYSIS IN ELECTRONIC MICROSCOPY**

*The electronic microscope, equipped with energy dispersive X-ray analysis system, let us carry out the local chemical element analysis. However hydrocarbon adsorbing surface and using of conducting polymers as fixing materials lead to artefacts. Researching results point out the opportunities of essential decreasing of artefacts' influence on the results of qualitative and quantitative definition of chemical composition at energy dispersive X-ray analysis in electronic microscopy.*

Electronic microscopy, SEM, energy dispersive X-ray analysis, EDX, artefacts

Оснащение растрового электронного микроскопа системой энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа INCA Energy позволяет с высокой локальностью проводить не только качественный, но и количественный анализ содержания химических элементов в приповерхностном слое объекта исследования.

Электронный зонд растрового электронного микроскопа, взаимодействуя с приповерхностным участком образца глубиной до нескольких микрон, помимо Оже-, вторичных электронов низкой энергии, обратно рассеянных (отраженных) электронов, катодолюминесценции, также генерирует характеристическое и тормозное рентгеновское излучение. Объем зоны взаимодействия пучка электронов с образцом зависит как от материала образца, так и величины ускоряющего напряжения. Расположение характеристических пиков в рентгеновском спектре позволяет определить химические элементы, содержащиеся в образце, их интенсивность – судить о количественном содержании.

Однако на практике сталкиваются с рядом артефактов, существенно искажающих результаты анализа и не позволяющих получать достоверные сведения о составе, структуре и морфологии объектов. В работе исследовано влияние и предложены пути снижения роли некоторых артефактов при рентгеноспектральном анализе в электронной микроскопии.

В электронной микроскопии известна проблема образования на поверхности исследуемого объекта в результате воздействия электронного зонда так называемого «нагара» (рис. 1). Нагар образуется вследствие разложения углеводородов, неизбежно присутствующих в камере микроскопа [1].

Рост нагара обусловлен преимущественно действием вторичных электронов и существенно увеличивается по мере увеличения дозы первичного облучения. На изображениях это проявляется, как правило, потемнением исследуемого участка объектов при существенном ухудшении контраста объектов (рис. 2). Скорость роста покрывающего слоя углерода может достигать на некоторых образцах нескольких нанометров в минуту, что существенно влияет на качество получаемых изображений. На рис. 2 б видна оболочка толщиной около 15-20 нм, покрывающая частицы, которая образовалась за 15 мин облучения электронным зондом участка поверхности площадью 1 мкм<sup>2</sup>.

Рентгеновские спектры регистрируют наличие углерода на объектах, заведомо не содержащих углерод. На рис. 3 а приведено изображение во вторичных электронах скола монокристаллического кремния после продолжительного облучения в течение 2 часов области 100×100 нм.

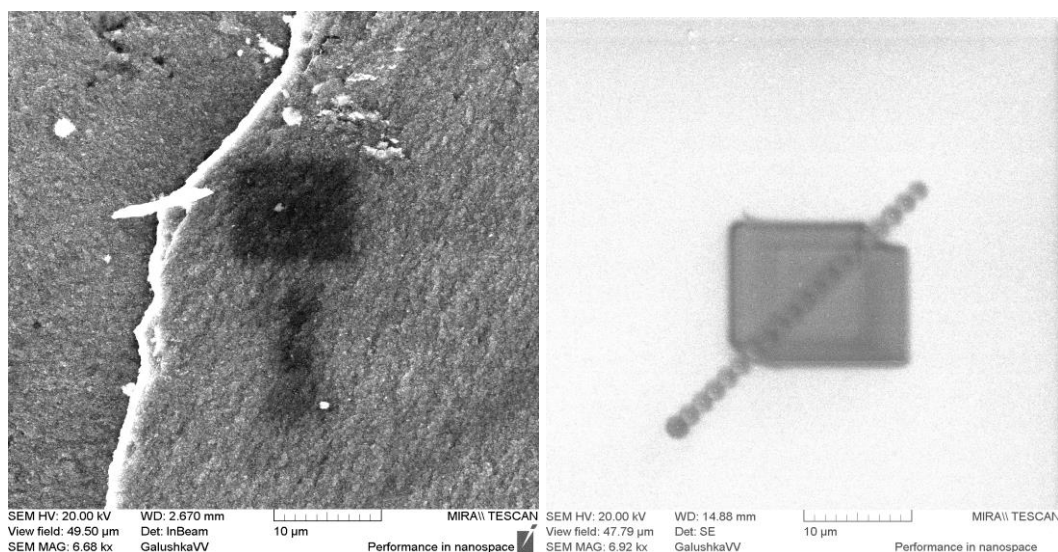


Рис. 1. Модификация исследуемого участка поверхности под действием электронного зонда в растровой электронной микроскопии

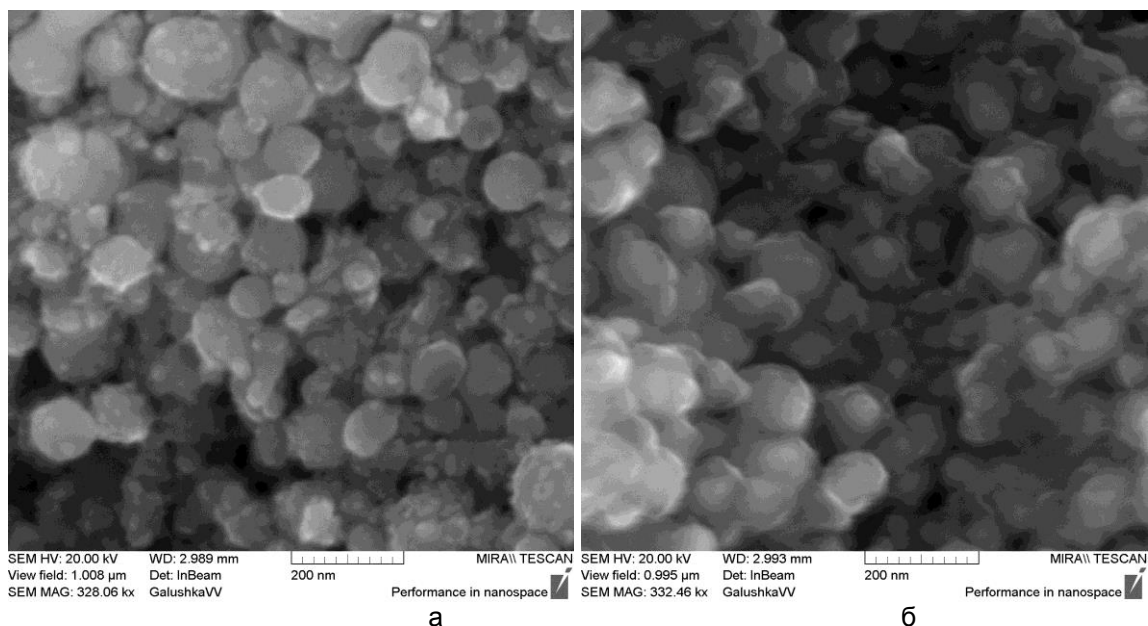


Рис. 2. Образование слоя углерода на поверхности частиц никеля за 15 мин облучения, морфология во вторичных электронах: а – до воздействия, б – после 15 мин воздействия

В радиусе 3-5 мкм от области воздействия также заметны изменения морфологии поверхности. Вдоль диагонали получен профиль распределения углерода, представленный на графике (рис. 3 б). Светлые точки на рис. 3 а – результат воздействия в течение 1 минуты электронного зонда при энергодисперсионном микроанализе.

Установлено, что даже непродолжительное воздействие (однократное накопление рентгеновского спектра в точке) приводит при анализе состава к обнаружению углерода в образцах, заведомо его не содержащих. Это приводит к существенной погрешности не только в доле углерода при работе с объектами, содержащими углерод, но также и к погрешностям в определении содержания остальных элементов в исследуемом объекте.

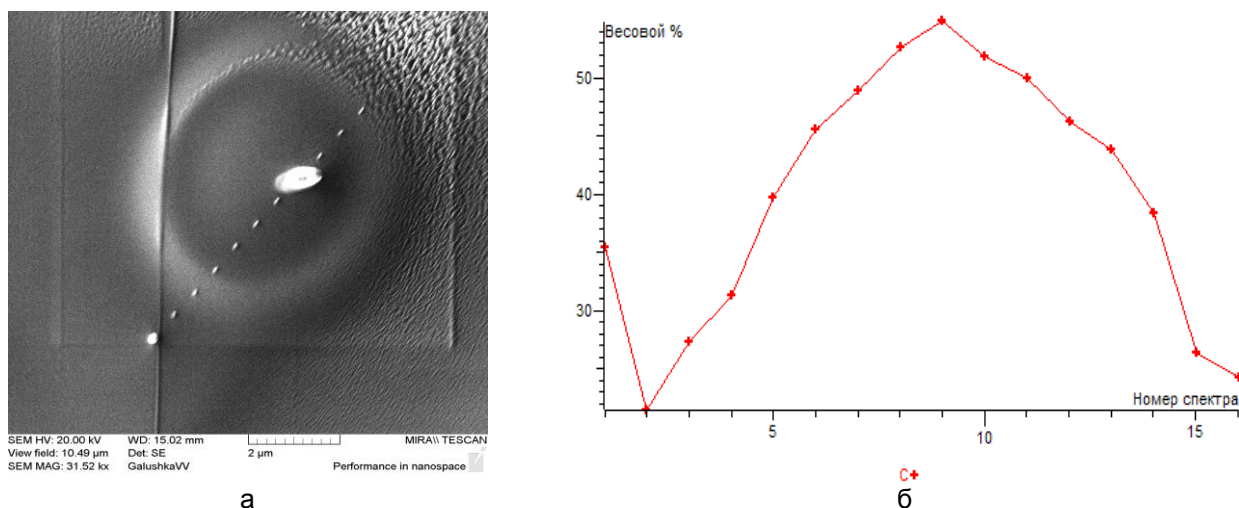


Рис. 3. Изображение поверхности скола монокристаллического кремния: а – после продолжительного локального облучения электронами; б – распределение содержания углерода по области пятна артефакта

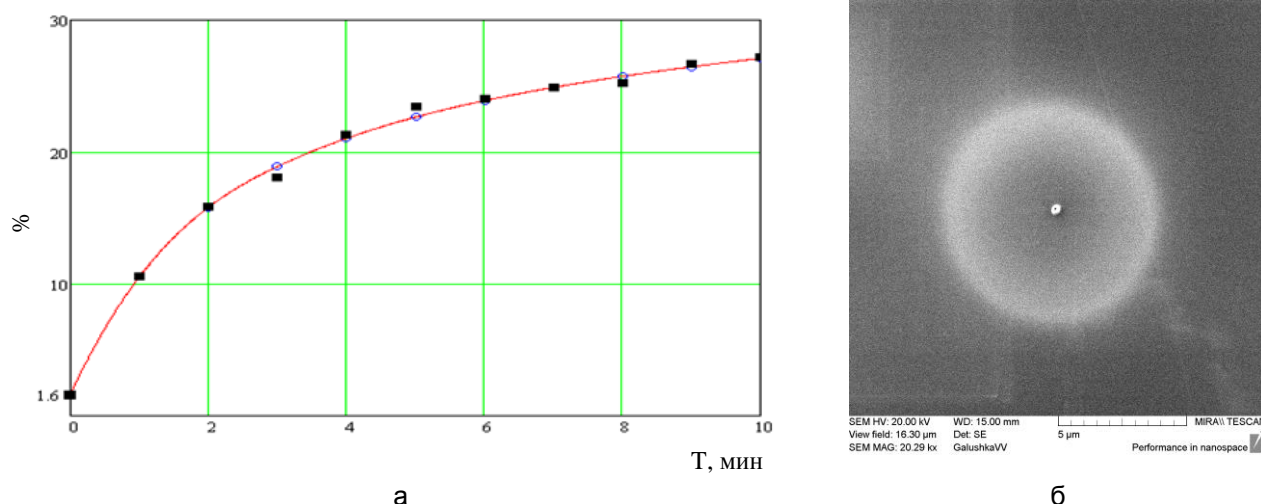


Рис. 4. Изменение содержания углерода во времени (весовые %) (а), след от воздействия электронным зондом в течение 10 мин (б)

Известен метод очистки травлением активными ионами кислорода, например с помощью приставки плазменной очистки Evactron [2]. Помимо дополнительного дорогостоящего оборудования, требуется наличие свободного шлюза на рабочей камере электронного микроскопа для монтажа приставки. К сожалению, плазменная очистка не избавляет полностью от проблемы загрязнения углеродом исследуемой поверхности, а лишь снижает его уровень.

Следует отметить, что адсорбция углеводородов на различные образцы не одинакова и не постоянна при различных токах пучка, ускоряющих напряжениях, предыстории измерений и работы прибора. Поэтому справедливость введения поправок заведомо ограничена.

Предлагаемый метод заключается в многократном измерении состава с одного участка поверхности и экстраполяция содержания углерода до момента начала измерения. Время одного измерения занимает приблизительно 1 мин; проведя 5 - 10 последовательных измерений и рассчитав зависимость содержания углерода от номера измерения или времени, можно экстраполировать кривую изменения содержания углерода до момента начала измерений.

На рис. 4 приведена полученная экспериментально зависимость содержания углерода на поверхности скола монокристаллического кремния в течение 10 мин воздействия на область размером  $100 \times 100$  нм при токе зонда 1 нА и ускоряющем напряжении 20 кВ. Средствами математического пакета Mathcad проведена экстраполяция экспериментальных значений до момента времени начала измерения.

При описанных условиях рентгеновского микроанализа первое измерение показало содержание углерода на сколе монокристаллической пластины кремния 10,6%. Результат математической обработки по 10 последовательным измерениям дает значение 1,6% в начале измерения, что почти на порядок точнее результатов однократного измерения. Ненулевое значение содержания углерода может быть объяснено адсорбцией углеводородов поверхностью до начала измерения состава.

Разработанная методика позволяет существенно снизить влияние такого артефакта как образование углеродного нагара, на результаты рентгеновского микроанализа при электронной микроскопии. Динамика роста содержания углерода на поверхности эталонного материала (например, кремния) может служить основой методики контроля за уровнем загрязнения углеводородами камеры электронного микроскопа.

Вторым рассматриваемым артефактом является ошибочное определение наличия и состава элементов, например углерода, вследствие рентгеновского отклика этих элементов, находящихся в слое, закрепляющем исследуемый образец.

Подготовка объекта для исследования методами растровой электронной микроскопии заключается в закреплении крупных образцов на держателе с помощью прижимных винтов, либо на столике с помощью электропроводной двусторонней липкой ленты (двусторонний токопроводящий углеродный скотч или двусторонние токопроводящие углеродные диски). Электропроводная двусторонняя липкая лента содержит органический полимер, в котором углерод составляет 70% и кислород 30% (содержание водорода не определяется).

Описанный способ закрепления образцов не позволяет получить достоверную информацию о количественном содержании углерода в исследуемом объекте, если толщина образца меньше глубины взаимодействия электронов с исследуемым материалом, это приводит к наложению рентгеновских характеристических линий спектров углерода, как от исследуемого объекта, так и от углеродсодержащего закрепляющего слоя. Толщина образца, при которой закрепляющий слой может существенно исказить результаты измерений, может достигать нескольких микрометров.

Необходима методика, позволяющая достоверно определять количественное содержание углерода в исследуемом образце. Предложено использовать в качестве связующего материала металл или сплав металлов с низкой температурой плавления (например, индий, олово и др.). Изначально предполагается, что применяемый металл или сплав не содержится в исследуемом объекте, и поэтому в регистрируемом рентгеновском спектре при количественной оценке его можно не учитывать. При возникновении сомнений можно провести дополнительное измерение состава, в котором заменён состав связующего материала.

Применение электропроводной двусторонней липкой ленты в качестве закрепляющего слоя дает завышенное содержание углерода и, как следствие, ошибку в определении содержания остальных компонентов в сравнении с методикой закрепления на легкоплавком металле. Используемый в растровой электронной микроскопии углеродный скотч содержит 70% углерода и 30% кислорода, что приводит к погрешности измерения этих компонентов в исследуемом образце. Погрешности определения состава при использовании углеродного скотча в качестве закрепляющего материала для нано- и микрообъектов могут превышать 10%. Это иллюстрируется результатами измерений, полученных с волокнистого материала из органического полимера, состав которого получен с использованием стандартного скотча и по предлагаемой методике. Сравнительные результаты представлены в таблице.

Видно, что доля закрепляющего материала (олово) составила более половины и в случае использования углеродного скотча эта доля приходится на скотч, в котором также содержатся интересные химические элементы.

Результаты проведенных исследований указывают на возможность существенного снижения влияния артефактов на результаты определения качественного и количественного состава локальных областей при рентгеноспектральном микроанализе в электронной микроскопии.

Результаты анализа волокон полимера

Закрепляющий слой	Весовой процент с учетом закрепляющего материала			Весовой процент за вычетом закрепляющего материала	
	O	C	Sn	O	C
Олово	20,53	27,35	51,12	46,85	53,15
Электропроводный скотч	34,65	65,35	-	34,4	65,6



## ЛИТЕРАТУРА

1. Egerton R.F. Radiation damage in the TEM and SEM / R.F. Egerton, P. Li, M. Malac. *Micron* 35. 2004. P. 399-409.
2. Larionov Yu.V. Effect of Sample Contamination in SEMs on Linear Size Measurements / Yu.V. Larionov, V.B. Mityukhlyayev, M.N. Filippov // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2008. Vol. 2, No. 5. P. 727-737.

**Галушка Виктор Владимирович** –

аспирант Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского, инженер Образовательно-научного института наноструктур и биосистем

**Биленко Давид Исаакович** –

кандидат физико-математических наук, профессор кафедры «Материаловедение технологии и управления качеством» Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 666.972.165

**Ю.Г. Ивашенко, Н.А. Козлов, Д.К. Тимохин**

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА КИНЕТИКУ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА**

*Описана актуальность применения бетонов с ускоренными темпами набора прочности в современном строительстве. Рассмотрены основные применяемые добавки для получения быстротвердеющих и высокопрочных бетонов. Предложено применение минеральной добавки на основе силикатов кальция и показана возможность её применения для производства бетонов с ускоренными темпами набора прочности.*

Цемент, бетон, прочность, минеральные добавки, модификатор, микрокремнезем, суперпластификатор, цементно-песчаный раствор

**Y.G. Ivashchenko, N.A. Kozlov, D.K. Timokhin**

**ASSESSMENT OF MINERAL SUPPLEMENTS FOR NATURAL AND MAN-MADE ORIGIN ON CURING KINETICS FINE CONCRETE**

*The article describes the relevance of concrete with accelerated curing in modern construction. The main additives used for quick-and high-strength concrete. Proposed use of mineral supplements on the basis of calcium silicates. Discusses the possibility of its use for the production of concrete with accelerated curing.*

Cement, concrete, strength, mineral admixtures, modifier, microsilica, superplasticizer, cement-sand mortar

В последние годы важным показателем современных бетонов считается высокая скорость набора прочности до 70% от марочной на 1 - 3 суток твердения бетона, при минимальных энергетических затратах на тепловую обработку.

На процесс тепловлажностной обработки (ТВО) 1 м<sup>3</sup> сборного железобетона затрачивается 40 - 60 кг условного топлива (110-170 МДж), а 85% общего объема сборного железобетона в России изготавливается с использованием ТВО при коэффициенте полезного действия тепловых установок около 30%. Разработка беспрогревных и малопрогревных технологий позволит значительно снизить энергопотребление при производстве железобетонных изделий.

Выпускаемые быстротвердеющие (БТЦ), высокопрочные (ВПЦ) портландцементы не решили проблемы получения высокопрочных быстротвердеющих бетонов. Для отечественных БТЦ регламентируемая прочность через 3 суток составляет не более 55 - 60% от нормативной. Только с использованием эффективных суперпластификаторов (СП), позволяющих понизить водосодержание бетонных смесей до 25 - 30%, стало возможным производство высокопрочных бетонов.

Для производства высокопрочных бетонов с ускоренными темпами набора прочности возможно применение вяжущего низкой водопотребности (ВНВ) и различных активных минеральных и органоминеральных добавок. Однако серийный выпуск ВНВ до сих пор не освоен российской цементной промышленностью, которая существенно сократила производство цемента марок М550 и практически полностью исключила выпуск цемента М600. В связи с этим проблема получения высокопрочных быстротвердеющих бетонов с высокими физико-механическими показателями в первые трое суток решается в существующих условиях с использованием цементов марок М400 и М500, высококачественных заполнителей, отечественных СП и дисперсных минеральных модификаторов [1].

В качестве активных минеральных модификаторов применяют добавки различной природы происхождения, природные и искусственные (техногенные). Природные добавки – это диатомит, трепелы и опоки, пеплы, туфы, пемзы, молотые высокопрочные горные породы. К техногенным добавкам относятся отходы или попутные продукты различных производств, такие как: микрокремнезем, бой силикатного и керамического кирпича, отходы от срезки горбушки при производстве газобетона, керамическая пыль, отходы от добычи и обработки каменных материалов, зола-унос, шлаки и т.д.

Активно ведутся исследования применения тонкодисперсных минеральных добавок в цементных бетонах, что связано, в первую очередь, с проблемой их утилизации и складирования. Следует отметить, что наиболее востребованы отходы с высокой удельной поверхностью, не требующие дополнительного помола. К таким отходам относят микрокремнезем, золу-унос, метакраолин, однако наибольшее распространение получил микрокремнезем.

Микрокремнезем обладает высокой удельной поверхностью и низкой насыпной плотностью, его применение обеспечивает увеличение прочностных характеристик бетонов, однако приводит к увеличению водопотребности бетонной смеси, что влечет применение добавок пластификаторов [1, 2].

Известно [1 - 3], что добавки-пластификаторы, которые позволяют снизить водопотребность бетонной смеси при рабочих концентрациях, отвечающих максимальному функциональному действию (пластифицированию и водоредуцированию), оказывают достаточно длительное блокирующее действие на кинетику твердения большинства цементов и набора прочности бетонов. Применение высокоактивных дисперсных модификаторов частично нейтрализует замедляющее действие СП, их оптимальное соотношение в бетонной смеси позволит обеспечить быстрый набор высокой прочности бетона. Особенно ярко проблема замедления набора прочности в присутствии минеральных и органических добавок проявляется при использовании цемента с повышенным содержанием алюминатов.

Исходя из общих экспериментально-теоретических положений наполненных цементных систем [1, 2, 4], количество дисперсного наполнителя может колебаться от 5 до 70%. Содержание дисперсных наполнителей в количестве 5 - 20% (микрокремнезем, зола) обычно

обеспечивает существенное повышение прочности бетонов; средние и высокие значения содержания наполнителей от 30 до 70% – экономию цемента с сохранением или снижением прочности бетонов.

Авторами [1, 3, 5] рассмотрена возможность применения других минеральных добавок на основе молотых бетонов серии «Бетонит» и кристаллических затравок из тонкомолотого цементного камня, на основе этих работ рассмотрена возможность применения добавок на основе силикатов кальция (СК), которая включает модифицированный тонкомолотый цементный камень. Объектом исследования послужил цементно-песчаный раствор (Ц : П = 1 : 3) при постоянном В/Ц = 0,42 на основе бездобавочного цемента М500Д0 производства ОАО «Вольскцемент». Пластифицирующая активность оценивалась по величине расплыва цементно-песчаного раствора на встряхивающем столике по ГОСТ 310.4-81. Пределы прочности на сжатие и изгиб определялись на образцах-балочках 4×4×16 см. Данные испытаний приведены в таблице. Уровень наполнения систем минеральными добавками был выбран минимальным 5 - 10% исходя из условий выполнения заданных физико-механических характеристик и минимальных затрат на их помол. Минеральные добавки измельчались в шаровой мельнице до удельной поверхности 4200 см<sup>2</sup>/г.

Анализ таблицы показал, что известные минеральные добавки, при использовании которых возможно достижение прочностных показателей, сравнимых с ВНВ, также повышают водопотребность бетонной смеси, что влечет применение супер и гиперпластификаторов.

Наиболее высокие прочностные показатели показали образцы с добавкой микрокремнезема, однако прочностные показатели образцов с предлагаемой добавкой на основе силикатов кальция практически не уступают образцам с микрокремнеземом.

Добавка СК не только не повышает водопотребность смеси, но, наоборот, обладает пластифицирующим эффектом. Анализ таблицы показал, что применение 10 % добавки на основе силикатов кальция нерационально, т.к. увеличение прочностных характеристик по сравнению с добавкой из 5 % СК незначительное. Применение 5 % добавки на основе силикатов кальция позволяет получать на 2 сутки нормального твердения от 50 до 60 % от марочной прочности, на 3 сутки нормального твердения – более 70 % от марочной прочности.

#### Физико-механические характеристики образцов с модифицирующими добавками

Количество и вид добавки, % от массы цемента	Расплав стандартного конуса, мм	Кол-во С-3, %	Ризг (МПа)				Рсж (МПа)			
			1 сут	2 сут	3 сут	28 сут	1 сут	2 сут	3 сут	28 сут
Контрольный	112	-	1,68	2,22	3,62	5,6	8,2	17,1	22,4	45,6
	158	0,5	1,22	1,67	2,9	5,9	5,4	12,7	17,6	47,7
Молотый известняк 5%	104	-	1,15	1,35	2,68	5,7	6,5	13,4	21,4	46,9
	137	0,5	1,25	2,35	3,77	6,3	7,0	17,3	20,7	47,8
Бой силикатного кирпича 5 %	107	-	1,73	2,66	3,92	6,2	9,2	18,9	32,6	51,4
	132	0,5	1,27	2,25	3,89	6,4	8,2	17,6	30,2	52,4
Отход от срезки «горбушки» газобетона 5 %	102	-	1,01	1,47	1,74	5,7	7,0	16,0	19,8	47,1
	125	0,5	1,29	2,15	3,67	6,4	7,1	18,7	27,0	48,4
Микрокремнезем 5 %	103	-	2,4	3,4	3,8	6,3	12,8	24,6	35,8	58,2
	125	0,5	2,5	3,8	4,2	6,6	13,6	27,2	37,4	60,1
Добавка на основе СК 5 %	122	-	2,25	3,59	4,27	8,3	9,1	26,4	36,2	54,4
	138	0,5	1,47	1,99	3,72	6,0	7,1	16,3	24,5	47,5

Добавка на основе СК 10 %	125	-	2,31	3,62	4,39	8,4	9,7	28,3	36,9	55,5
	141	0,5	1,55	2,42	3,9	6,7	8,0	18,4	26,9	50,1
Молотый мрамор 5%	105	-	2,1	3,28	3,79	6,2	8,9	20,4	32,8	52,4
	135	0,5	2,2	3,42	4,01	6,4	9,2	24,7	34,6	54,7
Микрокремнезем 10 %	110	0,3	2,9	3,7	4,8	7,2	17,7	30,1	41,5	61,4
	120	0,5	3,1	4,2	5,1	7,6	18,3	32,2	43,6	63,3
Микрокремнезем 5 % + добавка на основе СК 5 %	107	-	2,7	3,5	4,2	7,1	15,9	31,4	42,1	62,6
	128	0,3	2,9	3,9	4,9	7,4	17,1	33,4	43,9	63,6

На 28 сутки превышение прочностных показателей образцов с добавкой модификатором по сравнению с контрольным образцом составило около 20 %. Полученные данные позволяют сделать вывод, что применение минеральной добавки на основе силикатов кальция позволяет получать быстротвердеющие бетоны с высокими физико-механическими характеристиками.

На основе полученных данных предложено заменить часть дефицитного и дорогого микрокремнезема добавкой СК. Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что прочностные показатели образцов с комплексной добавкой на основе СК+Микрокремнезем в количестве 10% не уступают прочностным показателям образцам с добавкой 10% Микрокремнезема, а также снижает водопотребность бетонной смеси, что позволяет снизить расход суперпластификатора.

Присутствие суперпластификатора С-3 в составах с минеральными добавками замедляют начальные сроки твердения образцов, однако на 28 сутки прирост прочности во всех образцах составил 10-15%. При применении пластификатора С-3 в комплексе с добавкой на основе силикатов кальция полученный ранее эффект ускоренного набора прочности нивелировался (см. таблицу). Следует отметить, что для получения высокоподвижных и высокопрочных бетонных смесей с минеральной добавкой СК требуется внимательно назначать добавку – суперпластификатор для получения комплексного органоминерального модификатора.

Таким образом, установлена возможность получения бетонов с высокими физико-механическими показателями в ранние сроки твердения с применением минеральных добавок, которые могут использоваться при монолитном строительстве без применения или с ограниченной тепловой обработкой. Именно скорость набора прочности бетона определяет сроки выполнения распалубочных работ, оборачиваемости оснастки, следовательно, продолжительность процесса строительства зданий, и количество затраченных средств на строительство объекта в целом, также производство сборного железобетона по беспрогревной или малопрогревной технологии с температурой экзотермии 30-40°C с исключением или существенным сокращением энергетических ресурсов, повышением оборачиваемости тепловых агрегатов и производительности технологических линий. Важно отметить, что достигнутая прочность бетона с использованием микронаполнителей на основе природных и техногенных продуктов не уступает прочностным показателям бетонов с добавкой микрокремнезема.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баженов Ю.М. Модифицированные высокопрочные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. М.: Ассоциация строительных вузов, 2006. 368 с.
2. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. М.: Стройиздат, 1998. 768 с.

3. Строкова В.В. Оценка влияния кристаллических затравок на структурообразование цементного камня // В.В. Строкова, Л.Н. Моловьева // Строительные материалы. 2009. №3. С. 97-98.

4. Тараканов О.В. Применение комплексных добавок для повышения прочности бетона / О.В. Тараканов, Т.В. Пронина, Е.О. Тараканова // Популярное бетоноведение. 2008. №4. С. 26-29.

5. Ратинов В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. М.: Стройиздат, 1989. 188 с.

**Иващенко Юрий Григорьевич –**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Производство строительных изделий и конструкций» Саратовского государственного технического университета

**Козлов Николай Алексеевич –**

аспирант кафедры «Производство строительных изделий и конструкций» Саратовского государственного технического университета

**Тимохин Денис Константинович –**

ассистент кафедры «Производство строительных изделий и конструкций» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 538.97

**И.В. Маляр, С.В. Стецюра**

**МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПОДЛОЖКИ  
С ПОМОЩЬЮ ОРГАНИЧЕСКИХ МОНОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ  
И ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ**

*Показано, что модификация зарядовых свойств подложки и получение микронных и субмикронных электрических неоднородностей на поверхности достигаются несколькими способами: использование в качестве подложки гетерофазного фоточувствительного материала CdS-PbS, применение которого позволяет увеличить напряженность локализованных на узкозонных включениях электрических полей с помощью дополнительного направленного облучения; кроме этого необходимый эффект достигается использованием органических монослойных покрытий, структурированных металлом.*

Потенциал поверхности, гетерофазный полупроводник, пленки Ленгмюра-Блоджетт, морфология поверхности, зондовая сканирующая микроскопия

I.V. Malyar, S.V. Stetsyura

## THE SURFACE MODIFICATION OF SEMICONDUCTOR SUBSTRATE BY ORGANIC MONOLAYER COATINGS AND IRRADIATION

*It was revealed some methods to modify the charge properties of substrate and to prepare micron and submicron electric non-homogeneities on the surface. First method is utilization of heterogeneous photosensitive material CdS-PbS as substrate. It allows to enhance electric field densities, which are localized in the narrow-gap inclusions, by additional directed irradiation. Second one is utilization of organic monolayer coatings structured by metal.*

Surface potential, heterogeneous semiconductor, Langmuir-Blodgett films, surface morphology, scanning probe microscopy

### Введение

Интеграция органических и неорганических материалов в субмикронном и нанодиапазоне является многообещающим направлением для создания необычных функциональных материалов, поскольку комбинации твердотельных характеристик неорганических материалов с химическими или биофункциональными свойствами органических частей позволяют получать уникальные функции. Самоорганизация на молекулярном уровне для построения таких гибридных систем может быть достигнута несколькими методами: синтез, кристаллизация, самосборка и технология Ленгмюра-Блоджетт. Последний метод позволяет создавать ультратонкие мультислойные пленки с нанометровой контролируемой толщиной, которые далее могут быть перенесены на твердую подложку. Эти пленки могут содержать различные по форме и составу включения (органические и неорганические дендриты и кластеры). Такие пленки удобны для применения в различных устройствах, в частности, в качестве различных детекторов газов ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$  [2]) или органических соединений, включая белки [1].

Ключевым процессом для создания устройств с помощью технологии Ленгмюра-Блоджетт является перенос сформированного на поверхности водной субфазы органического монослоя на твердую подложку. При этом несколько параметров (рН и концентрации компонент в субфазе рабочего раствора, шероховатость и потенциал подложки и т.д.) влияют на этот процесс. Большинство из параметров являются интегральными, что не позволяет их использовать для управления латеральными размерами субмикронных областей, на которых в конечном итоге происходит адсорбция монослоя. Создание прогнозируемого рельефа поверхностного потенциала позволит решить эту проблему. В связи с выше изложенным целью работы являлось изучение возможности модификации зарядовых свойств полупроводниковой гетерофазной подложки с помощью органических монослойных покрытий и воздействия лазерного и/или электронного излучений для осуществления локального селективного присоединения субмикронных сенсоров к ее поверхности.

### Объекты и методы исследования

Для изучения возможности модификации поверхности и поверхностного потенциала созданы два вида образцов. Первый – это поликристаллические пленки на основе CdS, полученные термическим испарением в вакууме на стеклянную подложку. В исходную шихту добавлялось до 10 вес. % PbS, представляющего узкозонный полупроводник, имеющий ограниченную растворимость с CdS. Из-за низкой взаимной растворимости во время последующего отжига на воздухе в течение 15 минут при  $550^\circ\text{C}$  образовывались гетерофазные фоточувствительные пленки, которые представляли собой матрицу твердого раствора CdS-PbS с преимущественным содержанием CdS с включениями PbS-CdS с преимущественным

содержанием PbS [3]. Гетерофазные подложки на основе этих компонент представляют особый интерес, поскольку обладают высокой фоточувствительностью и деградационной стойкостью, что позволяет сделать управление с помощью оптического излучения эффективным.

Второй тип образцов – монослой арахината свинца, структурированный кластерами свинца, нанесенный на стекло с проводящим покрытием из индиево-оловянного оксида (ИТО). Монослой арахината свинца наносился на твердую подложку с помощью технологии Ленгмюра-Блоджетт по методу Шеффера. Так как поликристаллические пленки CdS обладают сложным рельефом поверхности и, соответственно, поверхностного потенциала, то отработка создания органического монослойного покрытия, приводящего к модификации поверхностного потенциала подложки, проводилась на стеклянных подложках с проводящим покрытием ИТО, обладающего низкой шероховатостью.

Дистиллированная вода со значением удельной электропроводности  $\Omega = 2 - 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$  и давлением поверхностного натяжения 72,8 мН/м при 20°C использовалась в качестве водной субфазы, в которую добавляли водный раствор нитрата свинца  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ . Формирование монослоя на поверхности водной субфазы, содержащей нитрат свинца, проводили нанесением раствора арахиновой кислоты  $\text{C}_{19}\text{H}_{39}\text{COOH}$  в хлороформе в объеме 0,2 мл и концентрации 0,001 моль/л на поверхность субфазы со значением  $\text{pH}=8,2$  и концентрацией соли металла  $\text{C} = 10^{-3}$  моль/л. Монослой сжимали подвижным барьером со скоростью 1 см/мин. При этом средняя скорость уменьшения площади монослоя составляла 12 см<sup>2</sup>/мин. При изменении площади пленки измерялось поверхностное давление с помощью весов Вильгельми и были получены  $\pi - A$  зависимости (изотермы сжатия, где  $\pi$  – поверхностное давление монослоя,  $A$  – площадь монослоя, приходящаяся на одну молекулу), по которым можно определить параметры монослоя [4]. Полученные ленгмюровские монослои выдерживались на поверхности водной субфазы в течение 15 минут (время экспозиции). Предполагается, что за это время происходит выветривание растворителя, протекает реакция замещения водорода ионом металла в головной части молекулы и происходит рост кластера металла [5]. Ранее показано, что, варьируя pH среды, можно получать как монослои с дендритами, так и с кластерами арахината свинца [6].

Морфология поверхности и измерение локальных электростатических характеристик структурированных монослоев проводились с использованием зондового микроскопа «Solver» в режиме атомно-силовой микроскопии (АСМ) и в режиме зонда Кельвина (СКЗМ) соответственно. Для этого использовался кремниевый кантилевер марки NSG11/Pt с токопроводящим покрытием из платины толщиной 30 нм, работой выхода  $e\phi = 5,32$  эВ ( $e$  – заряд электрона) и коэффициентом жесткости  $k = 2$  Н/м. Кантилевер представляет микромеханическое устройство, состоящее из закрепленной на основании кремниевой балки шириной 35 мкм, длиной 60 мм, толщиной 2 мкм и резонансной частотой механических колебаний около 76 кГц. На свободном конце балки со стороны ее нижней плоскости сформировано острие радиусом  $r = 35$  нм, углом конуса 21° и длиной иглы 15 мкм. Геометрические размеры игл позволяют проводить измерения потенциала с погрешностью, не превышающей 2,5% на расстоянии до 2 мкм от него. Применение АСМ-методов для исследования органических ультратонких пленок в полуконтактном режиме обеспечивает наименьшее повреждение органического покрытия.

Для получения распределения электрического потенциала по поверхности образца использовалась двухпроходная методика. На втором проходе кантилевер приводится в колебательное состояние на резонансной частоте, при этом образец заземлен, а на зонд подается постоянное смещение  $V_0$ , которое варьируется в диапазоне от -5 до +5. Емкостная сила взаимодействия зонд-образец приводит к сдвигу резонансной частоты. Соответственно амплитуда колебаний кантилевера уменьшается, и фаза его колебаний сдвигается [7]. При этом и амплитуда, и фаза колебаний могут быть измерены и использованы для отображения распределения и определения электрического потенциала по поверхности образца.

Морфология поверхности и распределение электрических неоднородностей на ней исследовались также на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan Mira\LMU с детектором тока, наведенного электронным пучком, – метод «electron beam induced current (EBIC)». Контраст на изображениях, полученных с помощью детектора тока, наведенного электронным пучком, зависит от разности скоростей генерации и рекомбинации носителей заряда, а также от наличия внутренних полей в исследуемой структуре.

### Экспериментальная часть

Монослои арахината свинца, полученные с помощью технологии Ленгмюра-Блоджетт при  $pH=8,2$  и концентрации нитрата свинца в рабочей субфазе  $C=10^{-3}$  моль/л, содержали кластеры арахината свинца размером до 2 мкм. После нанесения на подложку на поверхности наблюдается равномерное распределение кластеров и их агломератов, а между ними находится тонкий слой органического покрытия арахината свинца (рис. 1). О наличии органической пленки можно судить по черным точкам на поверхности, которые соответствуют порам (проколам) в пленке. Также на изображении заметно, что кластеры имеют огранку, соответствующую кристаллам арахината свинца.

Измерения поверхностного потенциала, проведенные методом СКЗМ при нулевом смещении на зонде, показали, что потенциал кластера отличается от потенциала поверхности слюды (рис. 2). Разность в значении потенциала составила порядка 100 мВ. Четкой границы между кластером и остальной поверхностью не наблюдается, но потенциал спадает приблизительно на величине в 1 мкм. Используя эти данные, можно рассчитать напряженность электрического поля. Она составила порядка  $10^3$  В/см. Таким образом, можно заключить, что данные образцы обладают ярко выраженным потенциальным рельефом, где на микронных участках имеются достаточно высокие напряженности электрического поля.

Подобные измерения проведены также на образцах, представляющих собой поликристаллические фоточувствительные пленки CdS-PbS. Как указано ранее, образцы имеют гетерофазную поверхность, где на поверхности основной фазы (матрицы) с преимущественным содержанием CdS имеются включения другой фазы – фазы с преимущественным содержанием PbS (рис. 3).

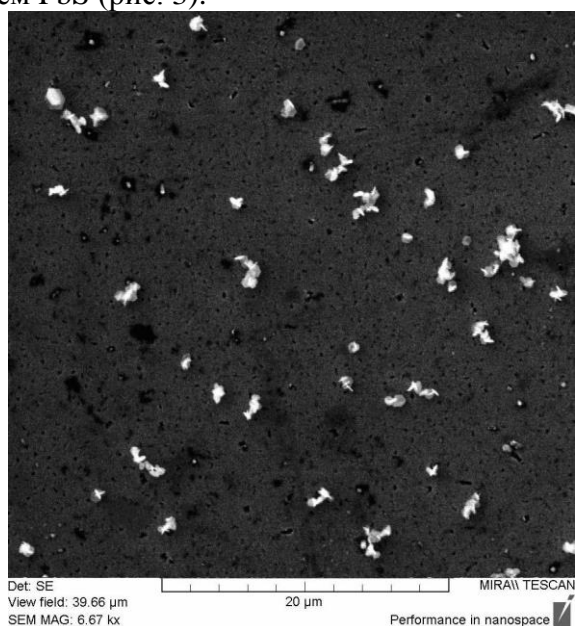


Рис. 1. Изображение во вторичных электронах поверхности слюды с нанесенной пленкой арахината свинца. Поле зрения 39,66 мкм

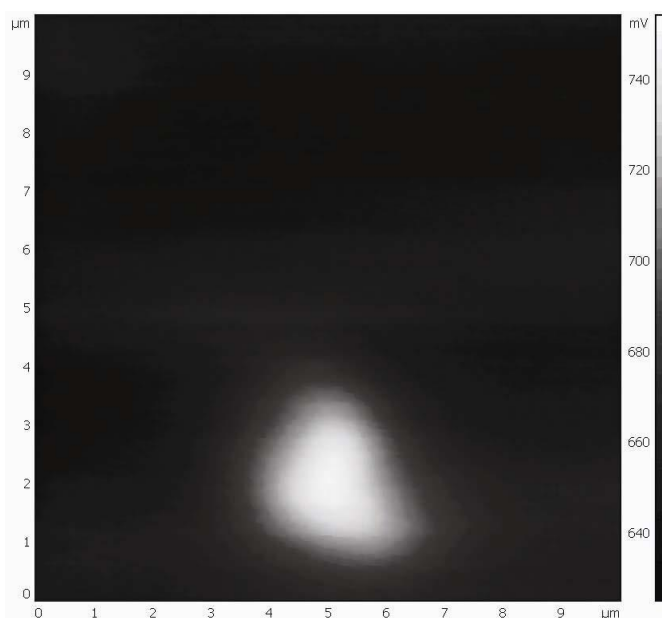


Рис. 2. Изображение распределения поверхностного потенциала поверхности слюды с нанесенной пленкой арахината свинца. Размер скана  $10 \times 10$  мкм<sup>2</sup>



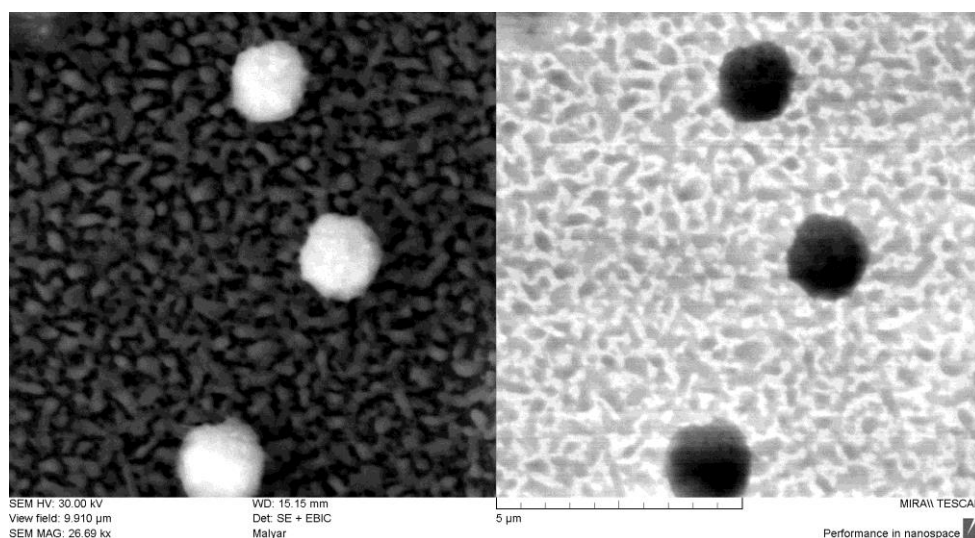


Рис. 3. Изображение во вторичных электронах (левая часть) и с детектора тока (правая часть), наведенного электронным пучком, поверхности отожженного образца CdS-PbS. Поле зрения 9,91 мкм

Эти две фазы существенно отличаются по электрическим свойствам, о чем свидетельствует высокая контрастность изображения, полученного в детекторе тока, наведенного электронным пучком. Это полностью соответствует литературным данным [8] известным электрофизическим характеристикам данных материалов: CdS относится к широкозонным фотопроводникам, PbS – узкозонный полупроводник, чувствительный к ИК-излучению. Размер узкозонных включений, определенных с помощью СЭМ составил порядка 1,5 мкм.

Измерения по методу СКЗМ показали, что поверхностный потенциал включений с преимущественным содержанием PbS отличается от потенциала основной поверхности пленки. Включения на поверхности обладают более низким потенциалом относительно основной поверхности на 500 мВ. В отличие от предыдущих образцов, на рис. 4 наблюдается более резкая граница между потенциалом включения и основной поверхностью – до 500 нм.

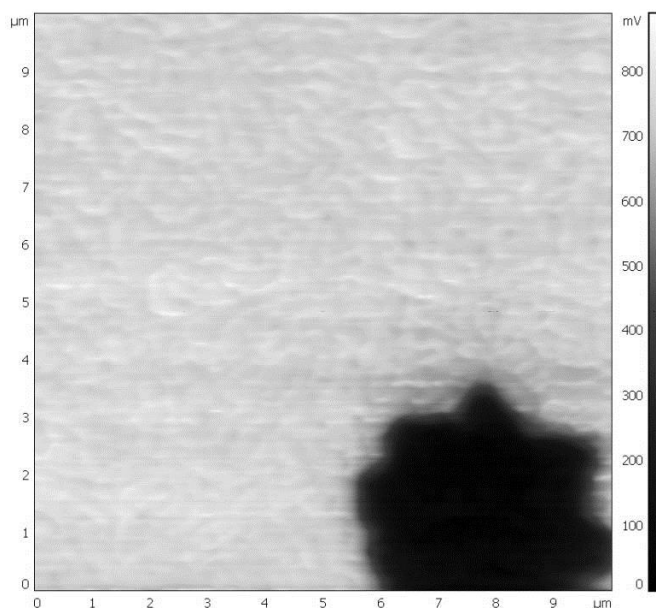


Рис. 4. Изображение распределения поверхностного потенциала поверхности слюды с нанесенной пленкой арахината свинца. Размер скана 10x10 мкм<sup>2</sup>

Рассчитанная локальная напряженность электрического поля имеет значение порядка  $10^4$  В/см.

Поскольку основная поверхность пленки (матрица) состоит из кристаллитов размером 300 - 400 нм, то существование межкристаллитных границ также приводит к появлению потенциального рельефа, но разность потенциалов при этом составляет не более 50 мВ. Рассчитанная по этим данным локальная напряженность электрического поля составила  $10^3$  В/см, что на порядок меньше по сравнению с электрическим полем на границе узкозонного включения и основной пленки.

Увеличение напряженности локальных электрических полей возможно также воздействием лазерным или

электронным пучком на фоточувствительную подложку, например CdS. При облучении лазером с мощностью 35 мВт и длиной волны 473 нм в непрерывном режиме в течение нескольких секунд происходила заметная модификация поверхности указанной пленки, проявлявшаяся в изменении морфологии и свойств облученной поверхности, а, следовательно, и потенциала.

### Заключение

Проведено изучение возможности модификации поверхностного потенциала различными технологическими способами. Оба предложенных способа основаны на процессах самоорганизации. Для твердых растворов в силу ограниченной взаимной растворимости происходит самоорганизация атомов в объеме пленки и на ее поверхности в результате протекания процесса диффузии. Для монослоев Ленгмюра проходит самоорганизация молекул, но только на границах раздела фаз. В результате образуются новые фазы, которые обладают отличными от основной пленки составом и структурой и, соответственно, потенциалом поверхности. Изменяя и контролируя параметры режимов получения пленок и покрытий, можно изменять размеры фаз на поверхности. В статье исследованы фазы микронных размеров, которые позволили сформировать локальные электрические поля напряженностью  $10^3 - 10^4$  В/см.

При дальнейшем нанесении на созданные таким образом подложки последующих органических монослоев, можно ожидать, что осаждение будет происходить не равномерно, а в зависимости от рельефа и потенциала подложки. Таким образом, можно добиться селективности осаждения различных органических пленок, которые могут в дальнейшем выступать как чувствительные элементы различных датчиков.

Авторы выражают признательность Климовой С.А. за предоставленные для исследования образцы органических монослоев.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №08-08-00764).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Changzhi Gu. The design and characteristics of a porphyrin LB film ChemFET gas sensor / Gu Changzhi, Sun Liangyan, Zhang Tong, Li Tiejun // *Thin Solid Films*. 1996. № 284-285. P. 863-865.
2. Hitoshi Ohnuki Amperometric cholesterol biosensors based on hybrid organic-inorganic Langmuir-Blodgett films / Ohnuki Hitoshi, Honjo Rikimaru, Endo Hideaki, Imakubo Tatsuro, Izumi Mitsuru // *Thin Solid Films*. 2009. № 518. P. 596-599.
3. Стецюра С.В. Влияние параметров узкозонных включений на тип и величину вторично-ионного фотоэффекта в гетерофазных фотопроводниках / С.В. Стецюра, И.В. Маляр, А.А. Сердобинцев, С.А. Климова // *Физика и техника полупроводников*. 2009, №. 43. Вып. 8. С. 1102-1108.
4. Янклович А.И. Регулярные мономолекулярные структуры ПАВ – пленки Ленгмюра-Блоджетт / А.И. Янклович // в кн. *Успехи коллоидной химии*. Л.: Химия. 1991. С. 263-291.
5. Львов Ю.М. Ленгмюровские пленки – получение, структура, некоторые применения / Ю.М. Львов, Л.А. Фейгин // *Кристаллография*. 1987. №.32. Вып. 3. С. 800-815.
6. Стецюра С.В. Зависимость морфологии, химического и фазового состава поверхности монослоя арахината свинца от технологии получения пленок / С.В. Стецюра, С.А. Климова, И.В. Маляр // *Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: труды XI международной конференции*. Ульяновск: УлГУ. 2010. С. 57.
7. Быков В.А. Сканирующая зондовая микроскопия для науки и промышленности / В.А.Быков, М.И.Лазарев, С.А. Саунин // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 1997. № 5. С. 7-14.
8. Марков В.Ф. Прогнозирование состава твердых растворов замещения  $Cd_xPb_{1-x}S$  при гидрохимическом осаждении из водных растворов / В.Ф. Марков, Л.Н. Маскаева, Г.А. Китаев // *Неорганические материалы*. 2000. №. 36. Вып. 12. С. 1421-1423.

**Маляр Иван Владиславович** –

аспирант кафедры «Материаловедение, технологии и управления качеством» Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

**Стецюра Светлана Викторовна** –

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Материаловедение, технологии и управления качеством» Саратовского государственного университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 577.345

**Е.В. Наумова, А.Г. Мельников, А.А. Поляков**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СЫВОРОТОЧНОМ АЛЬБУМИНЕ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ФОСФОРИМЕТРИИ**

*Предложен люминесцентно-кинетический способ определения наличия ионов тяжелых металлов в сыворотке крови, основанный на измерении кинетики затухания фосфоресценции люминесцентного зонда, связанного с белками. Установлено, что тяжелые металлы и люминесцентные зонды сорбируются на глобулах белка. Уменьшение интенсивности и времени жизни фосфоресценции зонда под их воздействием являлось аналитическим сигналом определения тяжелых металлов в белках. Создан импульсный фосфориметр для определения тяжелых металлов в сыворотке крови человека.*

Тяжелые металлы, сывороточный альбумин человека, фосфоресценция, люминесцентный зонд

**E.V. Naumova, A.G. Melnikov, A.A. Polyakov**

### **HEAVY METALS IONS DETECTION IN THE HUMAN SERUM BY THE METHOD OF PULSE PHOSPHORESCENCE**

*Luminescent-kinetic method for determination of heavy metal ions in blood serum based on measurements of the kinetics of quenching of the luminescent probes bound to proteins is proposed. It is established that both heavy metals and luminescent probes are localized in the protein globules. The decrease of intensity and lifetime of the phosphorescence of probe under the action of heavy metals was the analytical signal of the determination of heavy metals in the proteins. Pulse phosphorimeter for detection of heavy metals in human blood plasma was developed.*

Heavy metals, human serum albumin, phosphorescence, fluorescent probe

В связи со значительной интенсификацией техногенной деятельности человека увеличивается содержание ксенобиотиков в том числе и тяжелых металлов (ТМ) в объектах окру-

жающей среды [1]. Различными путями эти ксенобиотики попадают в живые организмы, приводя к необратимым негативным изменениям в них. Поэтому возникает необходимость в разработке новых способов своевременного и общедоступного контроля содержания тяжелых металлов в живых организмах. Известно [2], что, попадая в организм, ионы тяжелых металлов связываются с макромолекулами альбумина – основным белком плазмы крови. Плазма крови – жидкая часть крови, состоящая из воды, в которой растворены альбумины, гормоны, витамины, ферменты, продукты обмена веществ и другие соединения. Масса САЧ, находящегося в плазме крови, составляет 47-62% от всех ее белков. Альбумин выполняет следующие функции: транспортные, связывающие, поддержание внутриклеточного давления. Взаимодействие с ионами тяжелых металлов приводит к изменению физико-химических свойств белков и нарушает их функционирование.

Для аналитического определения содержания ТМ в сывороточном альбумине человека нами разработан люминесцентно-кинетический способ определения наличия тяжелых металлов основанный на явлении тушения фосфоресценции люминесцентного наномаркера - эозина [3] связанного с белками.

Для осуществления этого способа был применен созданный нами импульсный фосфориметр, конструкция которого представлена на рис. 1.

Под воздействием лазерного излучения 2 молекулы люминесцентного наномаркера, связанные с молекулами белка и являющиеся индикаторами изменения микроокружения, переходят в возбужденное состояние. При дезактивации этого возбужденного состояния происходит испускание кванта фосфоресценции. Световой поток излучения фосфоресценции, проходя через конденсорную систему 6, попадает на фотоэлектронный умножитель 7, преобразуется в электрический сигнал и передается на блок усиления сигнала 8. Далее через блок АЦП 9 сигнал поступает на ПК 10. Прошедшее через кювету 4 лазерное излучение попадает в оптическую ловушку 12.

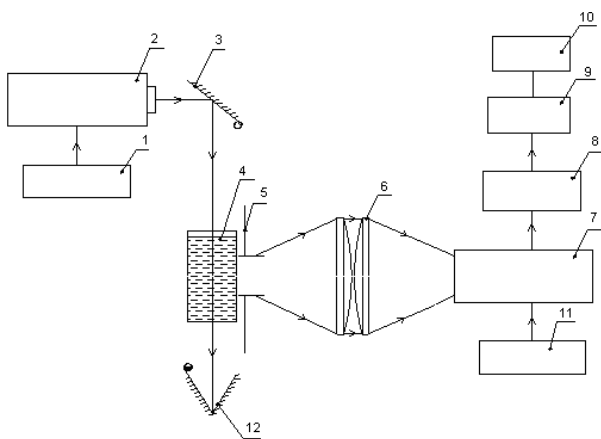


Рис. 1. Конструкция импульсного фосфориметра: 1 – блок питания источника света; 2 – импульсный источник света – лазер; 3 – поворотное зеркало; 4 – кювета с исследуемым раствором; 5 – диафрагма; 6 – двухлинзовый конденсор; 7 – фотоэлектронный умножитель; 8 – усилитель импульсов; 9 – аналого-цифровой преобразователь; 10 – персональный компьютер; 11 – блок питания ФЭУ; 12 – оптическая ловушка

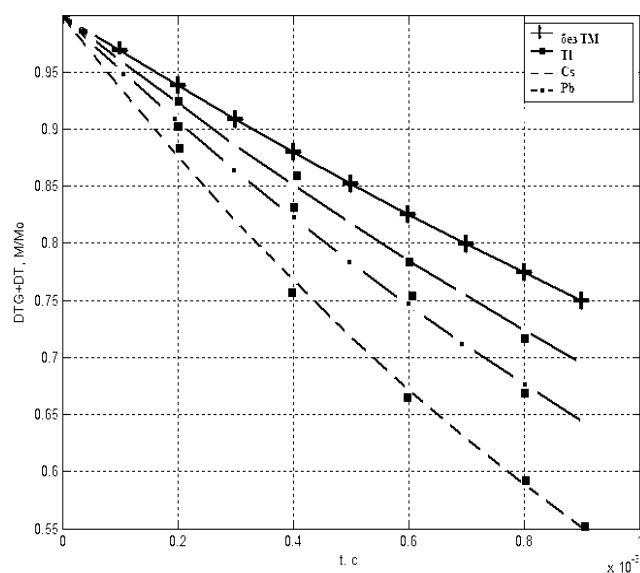


Рис. 2. Зависимость относительной интенсивности излучения фосфоресценции эозина в присутствии тяжелых металлов от времени, прошедшего после импульса

По полученным экспериментальным данным [4] построены градуировочные зависимости константы скорости затухания фосфоресценции от концентрации тяжелых металлов.

Согласно уравнению Штерна-Фольмера (1), определены константы скорости тушения [5] в допущении равномерного распределения тушителя по объему: для таллия  $3300 \text{ с}^{-1}$ , для свинца  $1500 \text{ с}^{-1}$ , для цезия  $670 \text{ с}^{-1}$ .

$$1/\tau = 1/\tau_0 + k_q [Q], \quad (1)$$

где  $1/\tau$ ,  $1/\tau_0$  – наблюдаемые константы скорости дезактивации триплетных состояний молекул люминофоров;  $\tau$  и  $\tau_0$  – времена жизни люминофоров при определенной концентрации тушителей и без него соответственно;  $[Q]$  – концентрация тушителя.

Однако водный раствор белка является микрогетерогенной средой. Неравномерность распределения обусловлена локализацией эозина и тушителя в белковой микрофазе. Для определения константы скорости тушения триплетных состояний эозина с учетом неравномерного распределения ионов тушителя и эозина в водном растворе белка предложена математическая модель, описывающая процессы дезактивации триплетных состояний эозина солями тяжелых металлов в водной фазе и в глобулах белка.

Пользуясь формализмом химической кинетики, составлены два дифференциальных уравнения первого порядка для скорости дезактивации триплетных состояний молекул эозина в белковой и водной среде:

$$\frac{d(C_2^T(\mathcal{E}))}{dt} = k_1 \cdot C(\Gamma) \cdot C_6^T(\mathcal{E}) - k_{-2} \cdot C_2^T(\mathcal{E}) - k_3 \cdot C(T) \cdot C_2^T(\mathcal{E}) - k_4 \cdot C_2^T(\mathcal{E}), \quad (2)$$

$$\frac{d(C_6^T(\mathcal{E}))}{dt} = -k_1 \cdot C(\Gamma) \cdot C_6^T(\mathcal{E}) + k_{-2} \cdot C_2^T(\mathcal{E}) - k_5 \cdot C_6^T(\mathcal{E}), \quad (3)$$

где  $C_2^T(\mathcal{E})$  – концентрация эозина в триплетном состоянии в глобуле белка,  $M$ ;  $C(\Gamma)$  – концентрация глобул белка,  $M$ ;  $C_6^T(\mathcal{E})$  – концентрация эозина в триплетном состоянии в воде,  $M$ ;  $C(T)$  – концентрация тушителя (тяжелых металлов),  $M$ ;  $k_1$  – константа скорости диффузии эозина в водной фазе,  $M^1 \text{ с}^{-1}$ ;  $k_{-2}$  – константа скорости выхода эозина из глобулы белка (число молекул, вышедших в единицу времени),  $\text{с}^{-1}$ ;  $k_3$  – константа скорости тушения фосфоресценции эозина ионами тяжелых металлов,  $M^1 \text{ с}^{-1}$ ;  $k_4$  – константа скорости мономолекулярного процесса дезактивации триплетных состояний эозина в глобуле белка в результате излучательных процессов,  $\text{с}^{-1}$ ;  $k_5$  – константа скорости мономолекулярного процесса дезактивации триплетных состояний эозина в водной микрофазе,  $\text{с}^{-1}$ .

Решение системы уравнений (4) получено аналитически.

$$C_2^T(\mathcal{E}) = C_2^T(\mathcal{E})_0 \cdot \exp\left(-\frac{1}{\tau(\mathcal{E})}\right). \quad (4)$$

На рис. 2 представлены результаты математического моделирования. Крестиками и точками обозначены экспериментальные данные. Кривые являются теоретическим результатом математического моделирования. Наилучшее согласие теоретических кривых с экспериментальными точками получено для следующих значений констант тушения: для таллия  $3533 \text{ с}^{-1}$ , для свинца  $1733 \text{ с}^{-1}$ , для цезия  $866 \text{ с}^{-1}$ , полученных методом математического моделирования. Значительное увеличение теоретических констант тушения по сравнению с экспериментальными свидетельствует о высокой локальной концентрации эозина и тушителя в глобуле белка.

Сравнение экспериментальных данных с результатами проведенного математического моделирования показало, что для количественной оценки концентрации тяжелых металлов, содержащихся в исследуемом сывороточного альбумина, необходима градуировочная зависимость с учетом неоднородного распределения частиц по объему.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Williams A.P. The metals of life / A.P. Williams // New York : Willey, 1971.
2. Петрова Г.П. Образование дипольных комплексов в растворах белков с малой концентрацией ионов тяжелых металлов: диагностика методом лазерного светорассеяния / Г.П. Петрова, Ю.М. Петрусевич, Д.И. Тен // Квантовая электроника. 2002. №10. С. 110-123.
3. Заявка на патент РФ № 2010119360 Люминесцентно-кинетический способ определения наличия тяжелых металлов в водных растворах и устройство для его осуществления / Г.В. Мельников и др.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Саратов. гос. техн. ун-т (СГТУ); заявл. 17.05.10, 10 с.
4. Лось Е.В. Эффекты тяжелого атома в изучении структурных изменений в белках люминесцентными методами / Е.В. Лось, А.Г. Мельников // Симпозиум «Нанопотоника»: сборник тезисов докладов / Черноголовка, 2007.
5. Рубин А.Б. Биофизика. Биофизика клеточных процессов / А.Б. Рубин. М: Изд-во МГУ, 2005. 468 с.

**Наумова Екатерина Викторовна** – аспирантка кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета

**Мельников Андрей Геннадиевич** – ассистент кафедры «Прикладная физика» Саратовского государственного технического университета

**Поляков Андрей Андреевич** – инженер отдела эксплуатации ЗАО «НСС»

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 54.057

**Н.С. Сухинина, В.М. Масалов**

### **КОЛЛОИДНЫЕ ЧАСТИЦЫ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ФИНИШНОЙ ПОЛИРОВКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Представлены исследования условий синтеза частиц диоксида кремния с высокой степенью монодисперсности как методом гидролиза тетраэтоксисилана в присутствии L-аргинина, так и при сочетании данного метода с традиционным методом Штобера. Показано, что сочетание метода гетерогенного гидролиза тетраэтоксисилана в присутствии аминокислоты для получения затравок и дальнейшего их доращивания методом Штобера, позволяет получать частицы SiO<sub>2</sub> с узким распределением их по размеру (отклонение по диаметру < 3%), практически совершенной сферической формы и гладкой поверхностью.*

Диоксид кремния, коллоидные частицы, полировка, полупроводники

N.S. Sukhinina, V.M. Masalov

## SILICA COLLOID PARTICLES FOR FINISHED POLISHING OF SEMICONDUCTOR MATERIALS

*The paper presents the study of the synthesis conditions of silica particles with high monodispersity both by hydrolysis of tetraethoxysilane in the presence of L-arginine, and the combination of this method with the traditional Stober method. It is shown that a combination of method of heterogeneous hydrolysis of tetraethoxysilane in the presence of amino acid to produce seeds and further their regrowth by Stober method, allows to obtain SiO<sub>2</sub> particles with a narrow size distribution (diameter deviation < 3 %), almost perfect spherical shape and smooth surface.*

Silica, colloid particles, polishing, semiconductors

Современный уровень техники получения эпитаксиальных структур требует обеспечения шероховатости подложек, приближающейся к атомно-гладкой поверхности. Это предъявляет более жёсткие требования к форме, размерам и дисперсности абразивных материалов, используемых в полировальных композициях.

Для финишной полировки высокотехнологичных материалов и изделий в микроэлектронике и оптике широкое применение получили частицы диоксида кремния. Составы на основе частиц SiO<sub>2</sub> оказались наилучшей средой для полировки полупроводников кремния и германия для современных интегральных схем, металлических пластин (медь и сплавы меди) в тонкопленочных магнитных головках, зеркал с высоким коэффициентом отражения и других материалов.

В настоящее время одним из распространённых материалов, применяемых в качестве абразивного компонента в составах для финишной полировки полупроводниковых пластин, является аэросил. Аэросил представляет собой чистую двуокись кремния. Выпускался в виде трёх марок: А-175, А-300 и А-380, в которых средний размер частиц соответственно равен: от 10 до 40 нм, от 5 до 20 нм и от 5 до 15 нм. Основным недостатком аэросилов является широкий диапазон разброса частиц по размеру и их нерегулярная форма.

Полировка пластин обычно выполняется в две стадии: первичная (начальная) и финишная полировки. При первичной полировке удаляются дефекты размером 10-50 микрон, причем, для ускорения процесса часто применяется абразив. После первичной полировки шероховатость пластин находится в интервале от 5 до 500 нм, что недостаточно для их практического использования.

Финишная полировка обеспечивает уровень шероховатости, который не выявляется методом дифференциальной оптической микроскопии. Авторы патента [1] достигли шероховатости менее 2 нм при полировке поверхности меди, используя коллоидные частицы SiO<sub>2</sub> со средним размером 36 нм.

В 1968 году Штобер с соавторами [2] предложили метод получения сферических частиц SiO<sub>2</sub>, основанный на гидролизе алкоксидов кремния в водных растворах спиртов в присутствии ионов аммония. В дальнейшем исследованию условий получения монодисперсных частиц SiO<sub>2</sub> посвящён ряд работ, однако многие аспекты процесса их синтеза остаются недостаточно изученными. Это касается как исследованных областей концентраций реагентов и температур, так и кинетики синтеза.

Возможность многоступенчатого выращивания частиц  $\text{SiO}_2$  позволяет контролировать их конечный размер в широком интервале значений (от десятков нанометров до единиц микрон). В этом случае частицы, полученные на первой стадии, используются в качестве «затравок» для дальнейшего их выращивания до нужных размеров поэтапным добавлением в систему дополнительных количеств тетраэтоксисилана  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  (ТЭОС). Таким образом удаётся значительно повысить массовую долю частиц  $\text{SiO}_2$  в конечной суспензии. Кроме того, распределение частиц по размерам сужается по мере их роста, поэтому предпочтительнее на первой стадии синтеза получать «затравки» минимально возможных размеров.

Модификации процесса Штобера остаются в настоящее время доминирующим способом синтеза коллоидных монодисперсных частиц диоксида кремния. Высокая монодисперсность (лучше 3 % в стандартном отклонении от среднего размера) может быть достигнута для частиц диаметром больше, чем 200-250 нм с дальнейшим улучшением монодисперсности пропорционально размеру частиц. Главное ограничение процесса Штобера остается в получении мелких частиц с узким распределением их по размеру. Самые мелкие частицы, которые могут быть синтезированы методом Штобера, имеют размер около 20 нм, при этом очень высокую полидисперсность (более 20 %). Этим методом не удается получать монодисперсные частицы  $\text{SiO}_2$  для размеров около 200 нм и ниже.

Недавно японская группа Т.Уокои и др. сообщила о новом подходе к синтезу коллоидных частиц диоксида кремния при гидролизе тетраэтоксисилана, получив монодисперсные частицы  $\text{SiO}_2$  размерами в интервале 12-23 нм. Метод основан на гидролизе тетраэтоксисилана в присутствии аминокислот, обладающих основными свойствами. Он позволяет получать частицы диаметром менее 50 нм с высокой степенью монодисперсности (~ 3-5 % отклонения по диаметру). Особенностью метода является шероховатая структура поверхности получаемых частиц. Однако при использовании этих частиц в качестве затравок и дальнейшем их доращивании методом Штобера структуру поверхности можно сделать гладкой.

Цель данной работы – исследовать условия получения комбинированным методом частиц диоксида кремния в широком диапазоне размеров с высокой степенью монодисперсности (< 3 % отклонения по диаметру) как с гладкой, так и с шероховатой структурой поверхности.

### Гетерогенный синтез в присутствии аминокислот

В экспериментах использованы химреактивы: тетраэтоксисилан (ТЭОС) 98 %, который подвергался предварительной очистке путём перегонки в ректификационной колонне, циклогексан 99.9 %, L-аргинин 99 % (Panreac), деионизованная вода (~ 18 МОм/см).

Синтез частиц  $\text{SiO}_2$  проводили в конических колбах при общем объёме реакционной смеси 250 мл. В деионизованную воду добавляли L-аргинин (1,5÷7,5 ммоль/л), тщательно перемешивали при помощи магнитной мешалки Elmi MS-01, совмещённой с водяным термостатом Elmi TW-2.02, при помощи которого температуру раствора доводили до температуры 30÷60 °С. После полного растворения L-аргинина к смеси добавляли раствор циклогексана (ЦГ) и ТЭОС в соотношении объёмов  $V_{\text{ЦГ}}/V_{\text{ТЭОС}} = 0\div 1,6$ . Синтез проводили в закрытой колбе при постоянной температуре и постоянном вращении мешалки со скоростями, обеспечивающими три различных режима перемешивания: («ламинарный», «турбулентный» и «эмульсионный»). В зависимости от режима перемешивания реакционной смеси можно выделить режимы: «ламинарный» – обеспечиваемый медленными скоростями вращения мешалки при которых граница раздела между водным раствором аминокислоты и раствором ЦГ/ТЭОС не разрушается и остаётся практически горизонтальной или слегка вогнутой. «Турбулентный» режим создаётся при большей интенсивности перемешивания, при которой образуется «воронка» по всей высоте жидкости. Граница раздела фаз при этом не разрушается. «Эмульсион-



ный» режим перемешивания обеспечивается ещё более высокими скоростями вращения мешалки, при которых из двух несмешивающихся жидких фаз образуется эмульсия.

В ходе синтеза производили отбор проб суспензии для определения массовой концентрации частиц диоксида кремния в воде.

### Результаты и обсуждения

На рис. 1 представлены зависимости увеличения массовой концентрации диоксида кремния в водной части системы, получаемого в ходе гидролиза тетраэтоксисилана в зависимости от времени проведения процесса при разной интенсивности перемешивания жидкости.

Как видно из графиков, представленных на рисунке, масса получаемого диоксида кремния в единицу времени увеличивается. Это связано с тем, что с ростом интенсивности перемешивания увеличивается площадь поверхности раздела двух взаимодействующих жидких фаз, что приводит к увеличению скорости реакции гидролиза тетраэтоксисилана.

Замедление скорости реакции гидролиза во времени (пологие участки кривых на рис. 1) происходит вследствие понижения концентрации ТЭОС в смеси с циклогексаном (ЦГ) за счёт его расхода в ходе реакции, а также с поступлением этилового спирта (продукта реакции гидролиза) в раствор ЦГ/ТЭОС. Этиловый спирт

имеет неограниченную растворимость во всех жидкостях, присутствующих в зоне реакции (в воде, ЦГ и ТЭОС). Поэтому он распределяется между двумя несмешивающимися жидкими фазами пропорционально их объёму. Кроме влияния на производительность метода, интенсивность перемешивания реакционной смеси определяет также размер и однородность получаемых частиц. С ростом интенсивности перемешивания средний размер частиц уменьшается, а их однородность увеличивается. Изменение температуры не влияет на производительность синтеза по диоксиду кремния, т.к. лимитирующей стадией реакции гидролиза является массоперенос через поверхность раздела двух жидких фаз.

Используя частицы диоксида кремния, полученные гетерогенным методом, в качестве затравок для дальнейшего доращивания их многоступенчатым вариантом методом Штобера, можно использовать преимущества обеих методик [3]. Гетерогенный метод гидролиза обеспечивает исходное узкое распределение по диаметру частиц-затравок, а метод Штобера – регулярную форму и гладкую поверхность конечных частиц. При добавлении на каждой ступени роста новых порций ТЭОС для доращивания частиц до нужного размера необходимо соблюсти условие: концентрация первичных частиц не должна превышать критическую, иначе можно получить бимодальное распределение частиц по размерам. Добавление новых количеств ТЭОС следует производить после завершения роста частиц на предыдущем этапе. Время завершения цикла роста частиц зависит от концентрационных и температурных параметров проведения процесса.

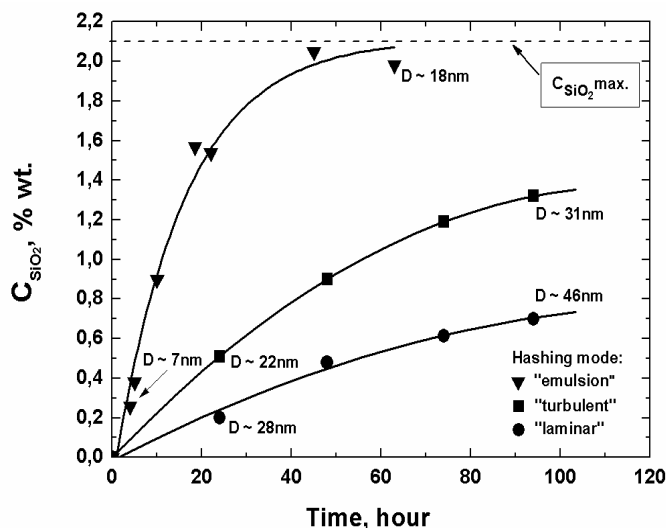


Рис. 1. Увеличение весовой концентрации наночастиц диоксида кремния в ходе их синтеза при различной интенсивности перемешивания реакционной смеси

На рис. 2 а показаны частицы-затравки размером 45 нм, полученные методом гетерогенного гидролиза ТЭОС. На рис. 2 б – выращенные из них методом Штобера частицы диоксида кремния размером 300 нм.

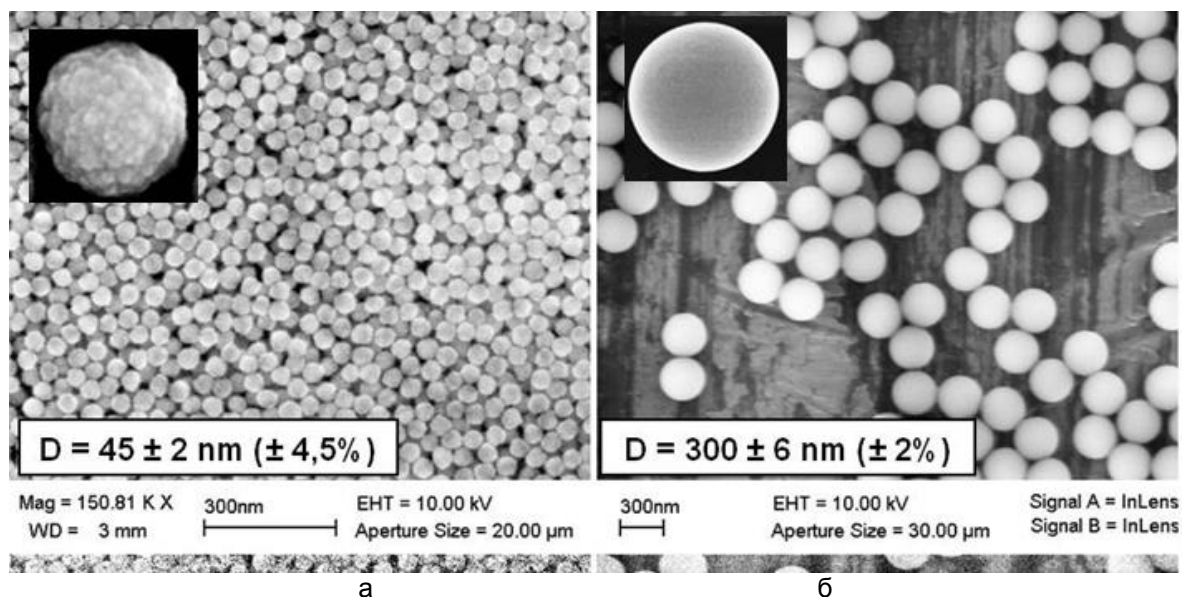


Рис. 2. СЭМ – снимки частиц SiO<sub>2</sub>: а – с шероховатой поверхностью; б – гладкой поверхностью

Таким образом, предлагаемый подход позволяет получать коллоидные частицы SiO<sub>2</sub> в виде нейтральной водной суспензии с размерами в диапазоне от 15 нм до 200 нм и стандартным отклонением от среднего значения менее 3 % в диаметре. Основным преимуществом такого метода является эффективный контроль формы, размеров и дисперсности получаемых частиц. Имеется возможность управляемого получения сферических частиц как с гладкой, так и с развитой «шероховатой» поверхностью. Метод обеспечивает получение суспензий наночастиц диоксида кремния с концентрациями до 10 % вес. в одном технологическом цикле с высоким (до 80 %) выходом годного по исходным реактивам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Haisma J. et al. Method of polishing a surface of copper or an alloy comprising mainly copper. US Patent № 5, 622, 525 (1997).
2. Stöber, W. Controlled growth of monodisperse silica spheres in the micron size range / W. Stöber, A. Fink, E. Bohn // J. Colloid Interface Sci. 1968.V.26. P.62-69.
3. Масалов В.М. Коллоидные частицы диоксида кремния для формирования опалоподобных структур / В.М. Масалов, Н.С. Сухинина, Г.А. Емельченко // ФТТ – 2011 (в печати).

**Сухинина Надежда Сергеевна** –

инженер-исследователь лаборатории кристаллизации из высокотемпературных растворов Института физики твёрдого тела РАН

**Масалов Владимир Михайлович** –

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории кристаллизации из высокотемпературных растворов Института физики твёрдого тела РАН

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 621.9.015:629.12.002Б.С.

**Орлов, А.В. Королев, Н.В. Ермольчева****К ВОПРОСУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ, ОБРАБОТАННЫХ ДИСКРЕТНЫМ ВИБРАЦИОННЫМ РЕЗАНИЕМ**

*Рассматривается процесс образования частично регулярного микрорельефа на поверхности деталей методом дискретного вибрационного резания. Получена формула для оценки площади микролунки за период осцилляции резца в зависимости от режимов обработки и других технологических факторов. Построены номограммы для определения опорных поверхностей, которые позволяют осуществить технологическое обеспечение получения частично регулярного микрорельефа дискретным вибрационным резанием с требуемой величиной опорной поверхности.*

Частично регулярный микрорельеф, параметры микрорельефа, дискретное вибрационное резание, технологическое обеспечение

**B.S. Orlov, A.V. Korolyov, N.V. Ermol'cheva****TO QUESTION OF THE TECHNOLOGICAL PROVISION OF THE MICRORELIEF SURFACES OF THE DETAILS, PROCESSED BY DISCRETE VIBRATORY CUTTING**

*It is considered process of the formation partly regular microrelief on surfaces of the details by method of the discrete vibratory cutting. Formula is received for estimation area microhole for oscillation period incisor depending on mode of the processing and other technological factor. They are built nomograms for determination of the footprints, which allow to realize technological ensuring the reception partly regular microrelief by discrete vibratory cutting with required by value to footprint.*

Partly regular micro relief, parameters of the microrelief, discrete vibratory cutting, technological provision

Опыт эксплуатации машин и приборов убедительно показывает, что качество, надежность, долговечность зависят от характера контактирования сопрягаемых деталей друг с другом или с жидкой, газовой или другой средой, определяемого микрорельефом поверхности контактирующих деталей.

Так как технологический микрорельеф поверхностей деталей оказывает влияние на их эксплуатационные характеристики, то одной из проблем в области качества поверхности является изыскание и исследование методов обработки деталей, обеспечивающих возможность образования на поверхности деталей регулярных, тонко управляемых, аналитически рассчитываемых и легко образуемых и контролируемых микрорельефов.

Одним из методов нанесения микрорельефов на поверхности деталей машин является дискретное вибрационное резание (ДВР), позволяющее получать частично регулярный микрорельеф (ЧРМР) на поверхностях деталей тел вращения в виде дискретно расположенных серповидных микролунок [1].

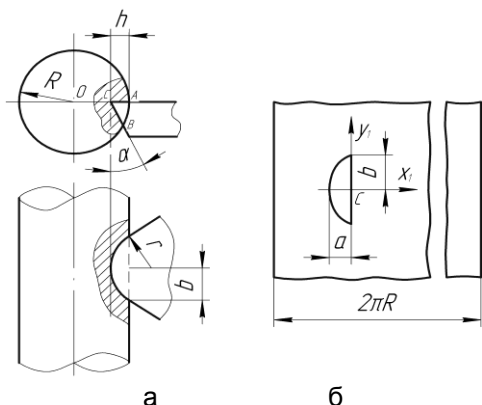


Рис. 1. Схема врезания резца в деталь (а), граница отпечатка резца на плоскости развертки поверхности цилиндра (б)

Важной задачей является создание микрогеометрии контактирующих поверхностей с оптимальными основными параметрами микрорельефа.

Ранее получена формула для определения площади микролунки на цилиндрической поверхности детали в предположении, что граница отпечатка резца на плоскости развертки цилиндра имеет вид полуокружности [2]. Однако при врезании резца в цилиндрическую поверхность без ее вращения образуется отпечаток, граница которого на плоскости развертки имеет вид кривой, близкой к полуэллипсу с большой полуосью отпечатка –  $b$ , определяемой по формуле (рис. 1)

$$b \approx \sqrt{2rh}, \quad (1)$$

где  $r$  – радиус резца;  $h$  – глубина врезания.

Малая полуось отпечатка –  $a$  представляет собой длину дуги АВ на наружной поверхности цилиндра детали (рис. 1):

$$a = \overset{\frown}{AB} = \pi R \cdot \angle AOC / 180^\circ, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус цилиндра.

В ходе расчетов получаем, что при врезании резца в наружную поверхность цилиндра горизонтальная полуось равна:

$$a = \pi R \cdot (90^\circ - \alpha - \arcsin((R-h) \cdot \cos \alpha / R)) / 180^\circ. \quad (3)$$

Для оценки стандартизированного параметра ЧРМР, т.е. относительной площади поверхности микролунок  $F_k$  (ГОСТ 244773-81), предпринята попытка построения уточненной математической модели (рис. 1 б). Рассмотрение образующего микрорельефа при дискретном вибрационном резании ведется на плоскости  $XOY$  развертки цилиндра. Начало координат является проекцией центра вершины резца на плоскости развертки цилиндра в начальный момент времени.

На рис. 2 показана траектория  $L$  движения центра  $C$  отпечатка, где  $\vec{v}$  – вектор окружной скорости заготовки;  $\vec{v}_1$  – вектор скорости движения центра  $C$  вдоль образующей цилиндра при отсутствии осцилляции;  $e$  – амплитуда осцилляции резца;  $T$  – период осцилляции резца;  $a$  – максимальная величина горизонтальной полуоси отпечатка;  $b$  – максимальная величина вертикальной полуоси отпечатка.

Траектория –  $L$ , движения центра  $C$  полуэллипса отпечатка на плоскости развертки задается параметрическими уравнениями:

$$x = v\tau, y = v_1\tau + e \sin(2\pi\tau/T), \quad (4)$$

Границы вырезанных микролунок представляют собой огибающие семейства полуэллипсов, являющихся границами отпечатков, центры которых задаются вышеприведенными уравнениями.

Поскольку параметрическое уравнение полуэллипса имеет вид:

$$x_1 = a \cos \beta, y_1 = b \sin \beta, \quad (5)$$

то в каждый момент времени  $\tau$  положение полуэллипса будет определяться следующими зависимостями (рис. 1):

$$x = v\tau - a \cos \beta \cdot \sin(2\pi\tau/T), y = v_1\tau + e \cdot \sin(2\pi\tau/T) \pm b \sin \beta \cdot \sin(2\pi\tau/T), \quad (6)$$

где (+) – в границах от 0 до  $0,25T$ , (–) – в границах от  $0,25T$  до  $0,5T$ .

Исключив  $\beta$  из этих соотношений, получим однопараметрическое уравнение семейства полуэллипсов:

$$y = v_1\tau + e \cdot \sin(2\pi\tau/T) \pm b/a \cdot \sqrt{a^2 \sin^2(2\pi\tau/T) - (v\tau - x)^2}. \quad (7)$$

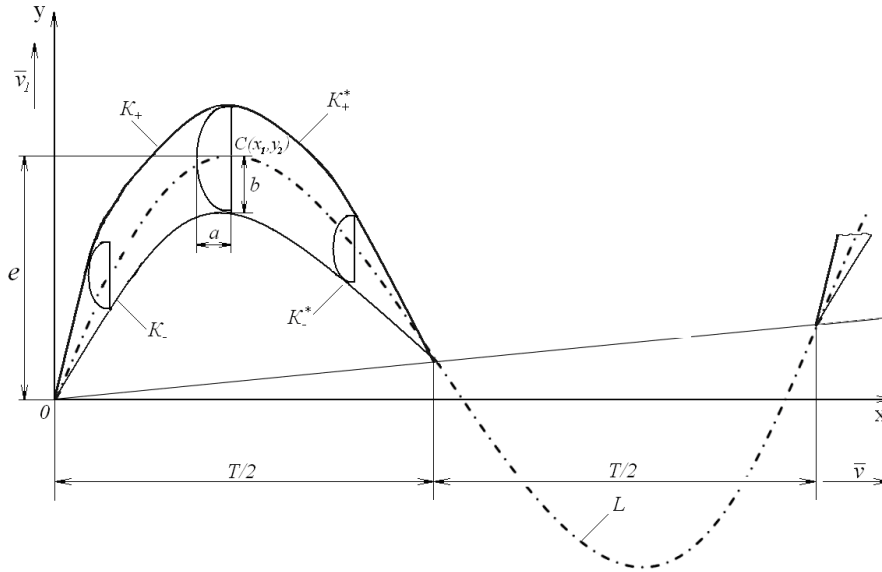


Рис. 2. Схема образования микролунки на плоскости развертки цилиндра

Для определения огибающей этого семейства полуэллипсов продифференцируем по  $\tau$  обе части этого выражения. Выразив через  $k = 2\pi e/Tv$  и учитывая, что  $v_1/v \approx 0$  и  $a^2/e = b^2/e \approx 0$ , решение уравнения (7) принимает вид

$$x = v\tau - \frac{a^2 k \sin(4\pi\tau/T)}{2\sqrt{b^2 + a^2 k^2 \cos^2(2\pi\tau/T)}}. \quad (8)$$

Подставляя выражение (8) в уравнение (7), получим

$$y = v_1\tau + e \cdot \sin(2\pi\tau/T) \pm \frac{b}{a} \cdot \sqrt{a^2 \sin^2(2\pi\tau/T) - \frac{a^4 k^2 \sin^2(4\pi\tau/T)}{4(b^2 + a^2 k^2 \cos^2(2\pi\tau/T))}}. \quad (9)$$

Таким образом, уравнения кривых  $K_+$  в пределах границ от 0 до  $0,25T$  и  $K_-^*$  в пределах границ от  $0,25T$  до  $0,5T$  имеют вид

$$x = v\tau - \frac{a^2 k \sin(4\pi\tau/T)}{2\sqrt{b^2 + a^2 k^2 \cos^2(2\pi\tau/T)}}, \quad (10)$$

$$y = v_1\tau + e \cdot \sin(2\pi\tau/T) \pm \frac{b}{a} \cdot \sqrt{a^2 \sin^2(2\pi\tau/T) - \frac{a^4 k^2 \sin^2(4\pi\tau/T)}{4(b^2 + a^2 k^2 \cos^2(2\pi\tau/T))}},$$

где (+) – для кривой  $K_+$ , а (-) – для кривой  $K_-^*$ .

Для расчета площади микролунки  $f$ , образуемой за один период  $T$  осцилляции резца, используем известную формулу для вычисления площади криволинейной трапеции в случае кривой, заданной параметрически:

$$Q = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} y(\tau) \cdot x'(\tau) d\tau. \quad (11)$$

Площадь микролунки на рис. 2 представляет собой величину

$$f = Q_{K_+} - Q_{K_-} + Q_{K_+}^* - Q_{K_-}^*, \quad (12)$$

где  $Q_{K_+}$  и  $Q_{K_+}^*$  – площади криволинейных трапеций, заключенных между осью  $Ox$  и кривыми  $K_+$  и  $K_+^*$  в пределах от 0 до  $0,5T$ ;  $Q_{K_-}$  и  $Q_{K_-}^*$  – площади криволинейных трапеций, заключенных между осью  $Ox$  и кривыми  $K_-$  и  $K_-^*$  в пределах от 0 до  $0,5T$ .

С учетом полученных выражений для  $Q$  и площадей трапеций, площадь микролунки за период осцилляции реза  $f$  при дискретном вибрационном резании определяется выражением

$$f = \frac{2be}{k} + \frac{\pi eb}{6k} + \frac{\pi ka^2}{6} + \frac{\sqrt{2}\pi eb^2}{3k\sqrt{b^2 + 0.5a^2k^2}} - \frac{\sqrt{2}\pi a^4 b^2 k^3}{12(b^2 + 0.5a^2k^2)^2}, \quad (13)$$

где  $k = 2ei/d_3$  – коэффициент;  $i = n_{\text{ос.х}}/n_3$  – число циклов осцилляции реза за один оборот заготовки;  $d_3$  – диаметр обрабатываемой поверхности.

Относительная площадь поверхности, рассчитывается по формуле [3]:

$$F_k = \frac{if}{\pi d_3 S} \cdot 100\%, \quad (14)$$

где  $S$  – продольная подача инструмента;  $d_3$  – диаметр обрабатываемой поверхности;  $i = n_{\text{ос.х}}/n_3$  – число циклов осцилляции реза за один оборот заготовки;  $f$  – площадь микролунки за период осцилляции реза.

Величина опорной поверхности:

$$F_{\text{он}} = 100\% - F_k. \quad (15)$$

На основе полученных аналитических зависимостей становится возможным решение задач технологического обеспечения дискретного вибрационного резания для образования поверхностей с требуемыми параметрами ЧРМР.

По формулам (13) - (15) разработаны номограммы для определения опорных поверхностей, равных 25, 30, 40, 50, 60 %. На рис. 3 представлена номограмма с опорной поверхностью равной 50 %.

Подобные номограммы позволяют осуществить технологическое обеспечение получения частично регулярного микрорельефа дискретным вибрационным резанием с требуемой величиной опорной поверхности.

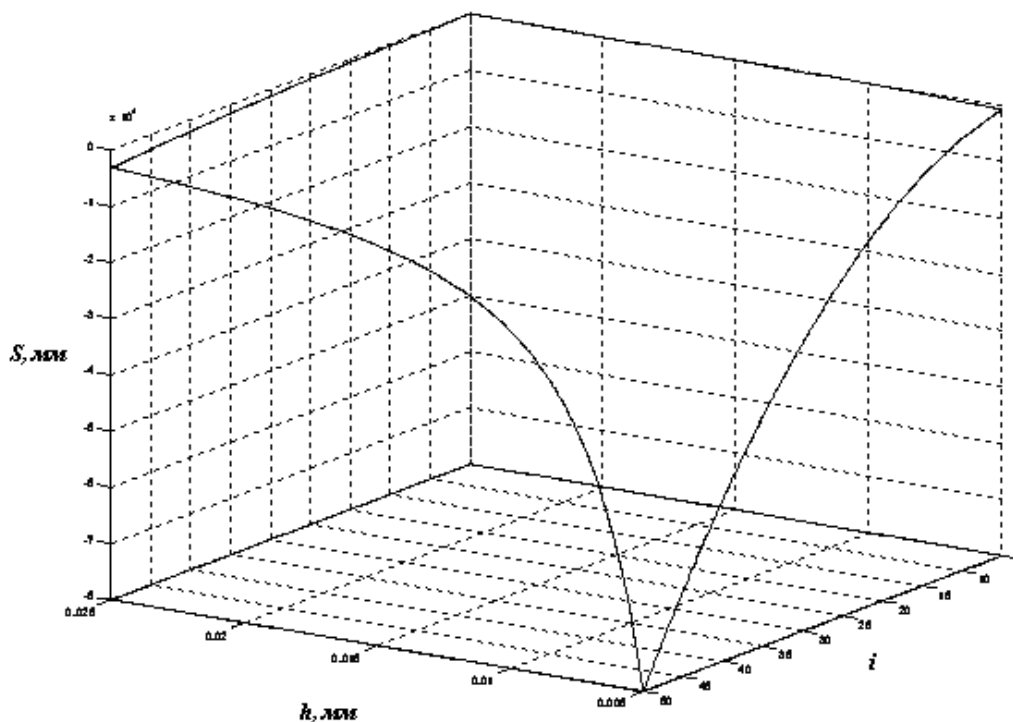


Рис. 3. Номограмма опорной поверхности

## ЛИТЕРАТУРА

1. Патент на полезную модель № 96810 Устройство для вибрационной обработки поверхностей / Б.С. Орлов, Д.В. Черепанов, А.А. Скрипкин, Н.В. Ермольчева. Бюл. № 23, 20.08.2010.
2. Орлов Б.С. К вопросу расчета параметров частично регулярного микрорельефа поверхности деталей при дискретном вибрационном резании / Б.С. Орлов, Н.В. Ермольчева // Вестник СГТУ. Саратов, 2009. № 3 (41). Вып. 2. С. 147-150.
3. Шнейдер Ю.Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства / Ю.Г. Шнейдер. Л.: Машиностроение, 1972. 240 с.

**Орлов Борис Степанович –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета

**Королев Альберт Викторович –**

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

**Ермольчева Надежда Викторовна –**

аспирант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 691.328.5

**Р.Х. Мухаметрахимов, В.С. Изотов**

**РАЗРАБОТКА ЦЕМЕНТНО-ВОЛОКНИСТЫХ ПЛИТ  
НА ОСНОВЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ВОЛОКОН**

*Представлены результаты разработки цементно-волокнистых (фиброцементных) плит на основе целлюлозных волокон. Показана возможность повышения их эффективности на основе модификации вяжущего активными минеральными и химическими добавками.*

Фиброцементные плиты, целлюлозные волокна

**R.H. Muhametrahimov, V.S. Izotov**

**DEVELOPMENT CEMENT-FIBER BOARD BASED ON CELLULOSE FIBERS**

*This article presents the results of cement-fiber (fiber cement) board based on cellulose fibers. The opportunity to increase their efficiency through the modification of binder active mineral and chemical additives.*

Keywords: fiber cement boards, cellulose fibers

В настоящее время большое внимание уделяется выразительному оформлению фасадов и внутренних интерьеров зданий. Для этого применяется широкий спектр современных отделочных материалов. Среди широкого ассортимента особое внимание заслуживают декоративные отделочные материалы для наружной и внутренней отделки, обладающие высокой механической прочностью и долговечностью, отличающиеся экологичностью и низкой себестоимостью. Одним из таких материалов является фиброцемент.

Фиброцементные плиты (ФЦП) заслуженно востребованы архитекторами, проектировщиками и строителями. Ими отделаны корпуса жилых, офисных зданий, учебных заведений, банков, станций метро и вокзалов, тоннели, мосты, эстакады [1]. Также применяются и для внутренней отделки: изготовление перегородок, подвесных потолков, подоконных плит и т.д. Они представляет собой искусственный композиционный каменный строительный материал, получаемый в результате затвердевания смеси, состоящей из цемента, волокон ( $\approx 5 - 20\%$  от массы цемента) и воды. Наиболее распространенным видом волокон для их производства являются асбестовые. Однако асбестовые волокна относятся к канцерогенным материалам, поэтому во многих странах мира, особенно в тех, в которых отсутствуют природные запасы асбеста, ведутся исследования, направленные на частичную или полную замену асбеста другими видами волокон органического или неорганического происхождения.

Проблема замены асбеста (полностью или частично) в производстве асбестоцементных изделий другими видами волокон давно привлекала внимание специалистов. Исследования в этой области ведутся во многих странах, в том числе и у нас. На основе проведенной ВНИИ-проектасбестцементом работы по созданию цементно-волоконистых изделий с частичной (до 50%) заменой асбеста целлюлозными волокнами на Воскресенском комбинате «Красный строитель» изготовлены асбестоцеллюлозноцементные листы, предназначенные для внутренней отделки зданий [2].

Волокна, используемые в качестве арматуры, должны обладать следующими свойствами: высокой температурой плавления, малым удельным весом, высокой прочностью во всем интервале рабочих температур, минимальной растворимостью в матрице, высокой химической стойкостью, отсутствием фазовых превращений в зоне рабочих температур, отсутствием токсичности при изготовлении и службе [3]. Технические характеристики некоторых видов волокон представлены в табл. 1.

Наиболее предпочтительным видом волокон, позволяющим достичь высокий технический и экономический результат с возможностью внедрения на типовой линии по производству асбестоцементных изделий на наш взгляд являются целлюлозные. Целлюлозное волокно обладает следующими положительными свойствами: легкой распушаемостью, достаточной механической прочностью и гибкостью, не является канцерогенным. Высокая адсорбционная способность позволяет ему осаждавать и прочно удерживать на своей поверхности зерна цемента. Армирующая способность определяет высокую механическую прочность на изгиб и растяжение затвердевшего материала. К прочим плюсам материала относится высокая щелочестойкость.

Настоящая работа посвящена повышению эффективности цементно-волоконистых плит автоклавного твердения на основе волокон целлюлозы, введением активных минеральных и химических добавок, а также изучению влияния модифицирующих добавок на кинетику тепловыделения и контракцию цементного теста. Классификация добавок их характеристики, виды, рекомендуемые дозировки, методы определения эффективности и подбора составов наиболее широко рассмотрены в [4].



Таблица 1

## Технические характеристики волокон для изготовления ФЦП

Вид волокна	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости, МПа	Удлинение при разрыве, %
Полипропиленовое	0,9	400-770	3500-8000	10-25
Полиэтиленовое	0,95	700	1400-4200	10
Нейлоновое	1,1	770-840	4200	16-20
Акриловое	1,1	210-420	2100	25-45
Полиэфирное	1,4	730-780	8400	11-13
Асбестовое	2,6	910-3100	68000	0,6
Целлюлозное	1,2	300-500	10000	0,5-4
Стеклоанное	2,6	1050-3850	70000-80000	1,5-3,5
Стальные фибры	7,8	800-3150	200000	3-4
Углеродное	2,0	2000	245000	1
Карбоновое	1,63	7800	380000	2,1
Полиамидное	0,9	720	1900	24
Вискозное	1,2	660	5600	14
Базальтовое	2,6	1600-3600	80000-110000	1,4-3,6
Волластонит	2,9	200-400	10000	0,2-0,5
Кевларовое	1,45	3600	150000	2,1-4
Полиакрилонитрил	1,2	900	20000	10

Таблица 2

## Химический состав портландцемента

Цемент	Процентное содержание главных окислов				Содержание основных минералов				Содержание добавок, %	
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	Опока	SO <sub>3</sub>
Вольский завод	22,5 5	4,75	4,7	65,04	57	21	4,6	14	8	2,2
Ульяновский завод	22,1	5	9	64	54	20	11	12	9,2	2,8

Таблица 3

## Содержание фракций кварцевого песка

Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	Содержание фракций	Значение характеристики, %
192	<5 мкм	9,5
	5-10 мкм	4,8
	10-20 мкм	9,1
	20-100 мкм	64,4
	100-200 мкм	11,1
	200-300 мкм	1,1

Для установления общих закономерностей влияния активных минеральных и химических добавок на свойства цементных композиций в работе использовали: портландцемент ПЦ400Д20 Вольского завода и портландцемент ПЦ400Д20 Ульяновского завода, химический и минералогический состав которых приведен в табл. 2; песок кварцевый молотый Камского

месторождения удельная поверхность и содержание фракций песка приведено в табл. 3; каолин (ГОСТ 19608-84); трепел Джабужского месторождения Калужской области (аморфный  $\text{SiO}_2 = 52,22\%$ ), полиакриламид (ПАА) анионный Besfloc 4045, целлюлозные волокна (СТО 00279189-2-2007); водопроводная питьевая вода, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732.

Технология производства фиброцементных плит аналогична технологии по производству асбестоцементных изделий и состоит из следующих технологических операций: распушка волокнистого материала, смешение ее с минеральными заполнителями, цементом и водой, формование изделий, прессование, твердение и механическая обработка.

Приготовление фиброцементной смеси осуществлялось в следующей последовательности. Дезинтеграция волокон целлюлозы согласно методике ГОСТ 14363.4-89. После завершения роспуска производилось отфильтрование волокна через сито и смешение его с цементом и песком до образования фиброцементной массы (ФЦМ) с концентрацией в воде 20-25%. ФЦМ укладывалась в формы и прессовалась по режиму: 10 мин – подъем давления до  $600 \text{ Н/см}^2$ , со скоростью – 10 кгс/с, 10 мин – выдержка под давлением.

Полученные изделия подвергались ТВО в пропарочной камере (по режиму: 2 ч – подъем температуры до  $65^\circ\text{C}$ , изотермическая выдержка в течении 4 ч, 2 ч – охлаждение) и автоклавной обработке (по режиму 3 ч – подъем до температуры  $175 - 180^\circ\text{C}$ , 6ч – изотермическая выдержка под давлением 0,9-1 МПа, 3 ч – охлаждение).

Для оценки влияния добавок на процесс гидратации проведены экспериментальные исследования кинетики тепловыделения при гидратации цемента и контракции цементного теста с добавками. Исследования тепловыделения при гидратации цемента проводились термосным методом с использованием измерительного комплекса «Термохрон Ревизор TCR-#». Добавки вводилась с концентрацией в воде затворения равной 0,05, 0,10, 0,15 %. (рис. 1, а, б). Выявлено, что введение ПАА в цементное тесто, в зависимости от концентрации оказывает различное влияние на ход и кинетику гидратации портландцемента. Достижение температурного максимума на кривых гидратации портландцемента (рис. 1) с содержанием ПАА до 0,1% свидетельствует об интенсификации гидратации в начальный период твердения. Увеличение количества ПАА в составе более 0,1% приводит к замедлению процесса гидратации цемента и снижению температурного максимума. Также и удельное тепловыделение портландцемента во все сроки гидратации растет с увеличением содержания ПАА до 0,1% и снижается при дальнейшем увеличении его дозировки.

Контракцию цементного теста с добавками определяли на контракциометрическом тестере активности цемента «Цемент-прогноз». Результаты испытаний приведены на рис. 2.

Как видно из рис. 2 процесс контракции цемента с содержанием добавок 0,05 - 0,10% не значительно отличается от контрольного. При содержании добавки 0,15% процесс контракции цемента замедляется, вследствие чего удлиняется индукционный период гидратации цемента.

Как следует из рис. 1, 2 вводимые добавки способствуют увеличению процесса гидратации и рекомендуемым является содержание в количестве 0,05 - 0,10%.

По вышеописанной технологии изготовлены образцы ФЦП при Ц/П = 1/2, содержания волокон целлюлозы – 7,5 %. Испытания образцов проводились согласно методике ГОСТ 8747-88. По результатам экспериментальных данных получена математическая зависимость предела прочности при изгибе ФЦП от содержания каолина в составе матрицы, которая выражается полиномом третьей степени следующего вида:

$$R_{\text{изг}} = -9\text{E-}05x^3 - 0,001x^2 + 0,273x + 10,36, \quad (1)$$

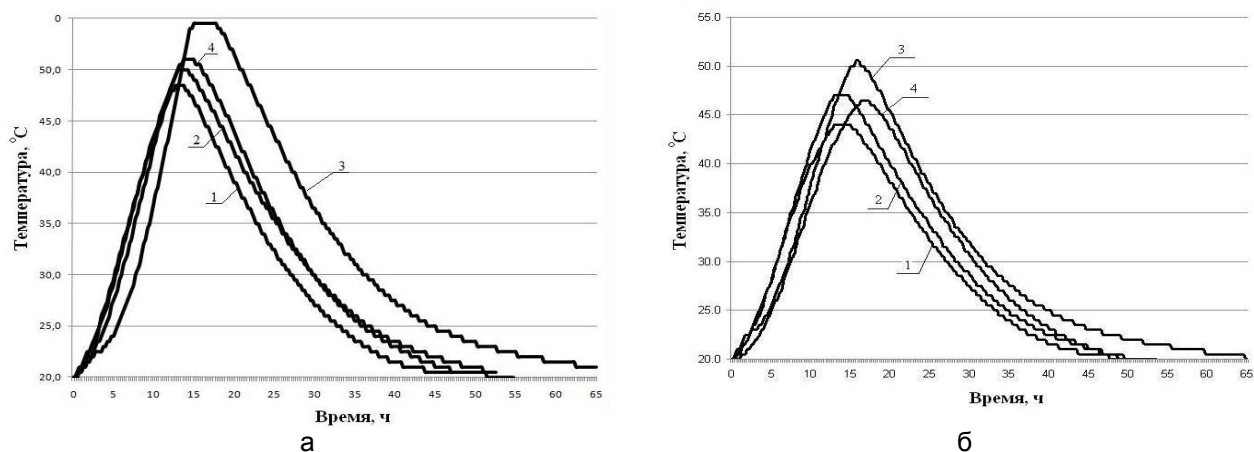


Рис. 1. Тепловыделение при гидратации на: а – Вольском портландцементе; б – Ульяновском портландцементе с добавками ПАА Besfloc 4045: 1 – без добавки; 2 – 0,05%; 3 – 0,10%; 4 – 0,15%

согласно которой максимальные показатели достигаются при содержании каолина 22-31 % от массы ПЦ. Введение в состав 9, 18, 27 % каолина повышает предел прочности при изгибе ФЦП на 27, 36 и 42 % соответственно. Увеличение содержания добавки каолина более 31 % приводит к снижению прочности. Также получена математическая зависимость предела прочности при изгибе ФЦП от содержания добавки трепела, которая выражается полиномом третьей степени следующего вида:

$$R_{изг} = 0,375x^3 - 4,524x^2 + 16,12x + 6,944, \quad (2)$$

согласно которой максимальные показатели достигаются при содержании трепела 2,5-5 % от массы ПЦ. Введение в состав 2,5-5 % трепела повышает предел прочности при изгибе ФЦП на 28-30 %. Дальнейшее увеличение содержания приводит к снижению прочности.

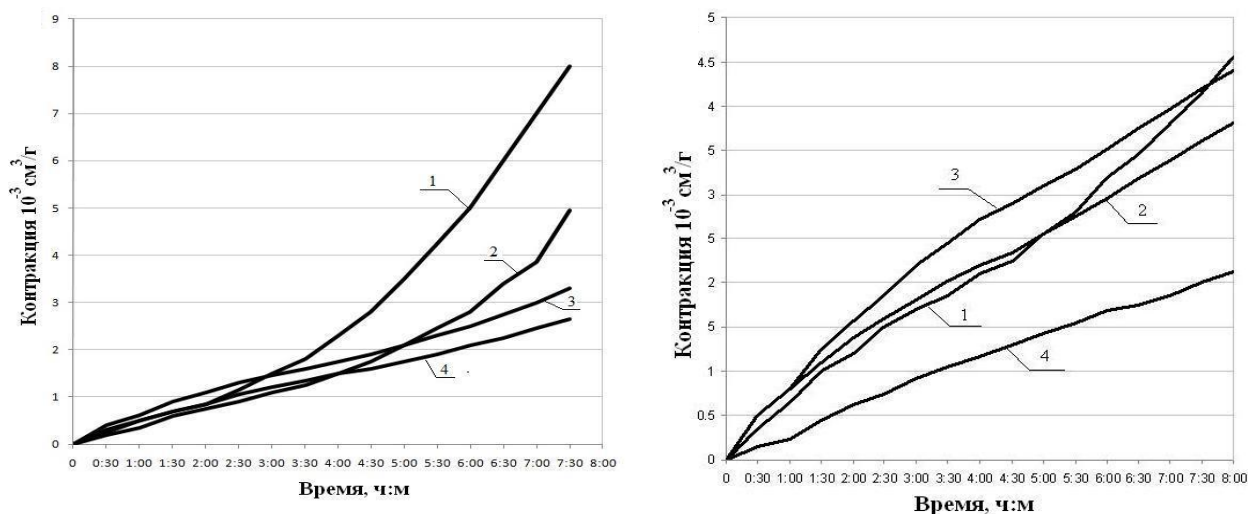


Рис. 2. Контракция цементного теста на: а – Вольском портландцементе; б – Ульяновском портландцементе с добавками ПАА Besfloc 4045: 1 – без добавки; 2 – 0,05%; 3 – 0,10%; 4 – 0,15%

В ходе экспериментальных исследований отмечено, что введение в состав более 0,10% ПАА затрудняет фильтрационную способность фиброцементной массы при прессовании из за высокой водоудерживающей способности композиции.

Полученные фиброцементный материал оптимального состава имеет показатели: предел прочности при изгибе 25 МПа, средняя плотность 1,6 г/см<sup>3</sup>, обладают следующими достоинствами: атмосферо- и морозостойкие (F100-F150), не воспламеняются и не распространяют огня, ударопрочные (2 кДж/м<sup>2</sup>), долговечные, экологичные. Могут успешно использо-

ваться в качестве отделочного материала, в том числе в качестве облицовочных панелей при устройстве навесного вентилируемого фасада.

Таким образом, можно сделать следующие выводы: 1) введение в цементно-волоконистую смесь добавки ПАА в оптимальном количестве позволяет улучшить фильтрационные способности фиброцементной суспензии и обеспечивает повышение предела прочности при изгибе на 12-20 %; 2) введение активной минеральной добавки – каолина, в количестве 18-27 % увеличивают предел прочности при изгибе ФЦП на 27 - 45 %; 3) введение активной минеральной добавки – трепела, в количестве 2,5-5 % способствует увеличению предела прочности при изгибе на 28-30 %; 4) совместное введение добавок ПАА и каолина, ПАА и трепела позволяет получить материал для ФЦП с пределом прочности при изгибе до 25 МПа и средней плотностью 1,6 г/см<sup>3</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лунин Е.М. Фиброцементные крупноразмерные декоративно-отделочные плиты «МИНЕЛИТ» для облицовки фасадов зданий / Е.М. Лунин, И.М. Баранов // Строительные материалы. 2004. №7. С. 16-17.

2. Цементно-волоконистые изделия с частичной заменой асбеста целлюлозным волокном / Л.С. Григорьева, М.Б. Рабей, О.В. Сулейман др. // Строительные материалы. 1992. № 10. С. 25-26.

3. Францевич И.Н. Композиционные материалы волокнистого строения / И.Н. Францевич, Д.М. Карпинос. Киев : Наукова думка, 1970. 403 с.

4. Изотов В.С. Химические добавки для модификации бетона / В.С. Изотов, Ю.А. Соколова. М.: Палеотип, 2006. 243 с.

**Мухаметрахимов Рустем Ханифович** –

аспирант, ассистент кафедры «Технология, организация и механизация строительства» Казанского государственного архитектурно-строительного университета

**Изотов Владимир Сергеевич** –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология, организация и механизация строительства» Казанского государственного архитектурно-строительного университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 621.372

**В.В. Муллин, А.С. Розов, Б.Н. Максименко, В.Б. Байбури**

#### **ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В «ДЛИННОЙ ЛИНИИ» В ТОЧКЕ РАЗРЫВА**

*В работе исследуются переходные процессы в «длинной линии», проведены оценки возвратного напряжения при выключении ВДК. Дана оценка нижней границы возвратного напряжения.*

Длинная линия, переходный процесс, ВДК

V.V. Mullin, A.S. Rozov, B.N. Maksimenko, V.B. Baiburin

**TRANSITION PROCESS IN THE «LONG LINE»  
AT THE POINT OF DISCONTINUITY**

*We investigate the transients in the «long line», used to estimate reverse voltage is turned off by vacuum arcs. We estimate lower boundary of the reverse voltage.*

Long line, transients, vacuum arcs

В [1, 2] предложены оценки возвратного напряжения, при отключении ВДК (вакуумно-дугогасительной камеры), при этом в качестве эквивалентной схемы был рассмотрен колебательный контур с затуханием, питаемый переменной ЭДС. В [2] показано, что пиковые значения возвратного напряжения могут увеличиваться в несколько раз. Представляет интерес тот случай, когда переменная ЭДС и нагрузка связаны «длинной линией». В этом случае можно определить нижнюю границу пикового значения возвратного напряжения. Целью данной работы является оценка возвратного напряжения при различных значениях тока отсечки. Анализ проводился применительно к схеме, изображённой на рис. 1.

Пусть ЭДС источника меняется по следующему закону:

$$u(x, t) = E_0 \cos(\omega t - \beta x + \varphi_0) . \tag{1}$$

В этом случае ток через сопротивление нагрузки равен

$$i(x, t) = I_m \sin(\omega t - \beta x + \varphi_0), \quad I_m = E_0/R . \tag{2}$$

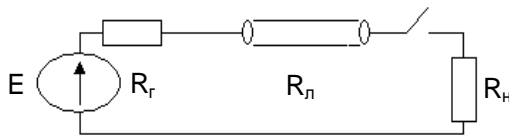


Рис. 1. Схема:  $R_r$  – сопротивление на генераторе;  
 $R_l$  – сопротивление длинной линии;  
 $R_n$  – сопротивление нагрузки

Процессы в «длинной линии» описываются телеграфными уравнениями

$$L \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + Ri = 0; \quad C \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial i}{\partial x} + Gu = 0 , \tag{3}$$

где  $L, C, R, G$  – погонные индуктивность, ёмкость, сопротивление и проводимость.

Примем ряд допущений:

- 1) линия согласована  $R_r = R_l = R_n$ ;
- 2) линия без потерь  $Ri = 0; Gu = 0$ ;
- 3) Длина линии  $l = 2\pi$ .

С учётом допущений система (3) примет вид

$$L \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0; \quad C \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial i}{\partial x} = 0 , \tag{4}$$

В случае, когда цепь размыкается при значениях тока  $i = 0$  Система уравнений (4) может быть решено точно [3]. Как показано в [3], в случае разрыва происходит скачок напряжения в 2 раза.

Для более детального анализа решим численно систему уравнений (4), для которой может быть получена следующая конечно-разностная схема:

$$\begin{aligned}
 u^{k+1,j} &= u_{k,j} + \frac{\tau C}{2h} (i_{k,j+1} - i_{k,j-1}) + \frac{\tau \sqrt{LC}}{2h} (u_{k,j+1} - 2u_{k,j} + u_{k,j-1}); \\
 i^{k+1,j} &= i_{k,j} + \frac{\tau L}{2h} (u_{k,j+1} - u_{k,j-1}) + \frac{\tau \sqrt{LC}}{2h} (i_{k,j+1} - 2i_{k,j} + i_{k,j-1}); \\
 u^{k+1,j} &= u(t + \tau; x); \quad i^{k+1,j} = i(t + \tau; x); \quad u_{k,j} = u(t; x); \quad i_{k,j} = i(t; x); \\
 u_{k,j+1} &= u(t; x + h); \quad i_{k,j+1} = i(t; x + h); \quad u_{k,j-1} = u(t; x - h); \quad i_{k,j-1} = i(t; x - h),
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$\tau = 0,01, h = 0,01$  величины разбиения сетки;  $L, C$  – безразмерные величины.

Рассматривалось три случая: 1) разрыв в момент, когда значение тока максимально  $I = 1$ ; 2) разрыв в случае  $I=0,5$ ; 3) разрыв в случае  $I=0$ .

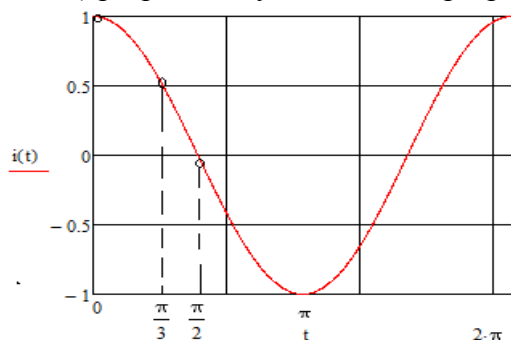


Рис. 2. Зависимость тока от времени в длинной линии в точке разрыва перед моментом разрыва

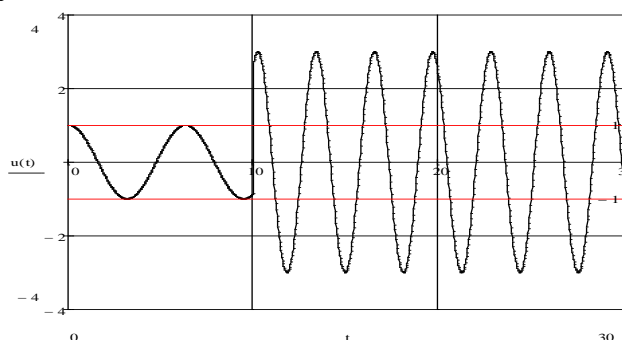


Рис. 3. Зависимость тока от времени для случая максимума тока  $I=1$

На рис. 2 изображены точки, в которых происходил разрыв.

Для каждого из указанных случаев построены зависимости значения возвратного напряжения от времени после момента разрыва.

Из графика на рис. 3 видно, что скачок напряжения составил 2,7 раза по отношению к начальной амплитуде.

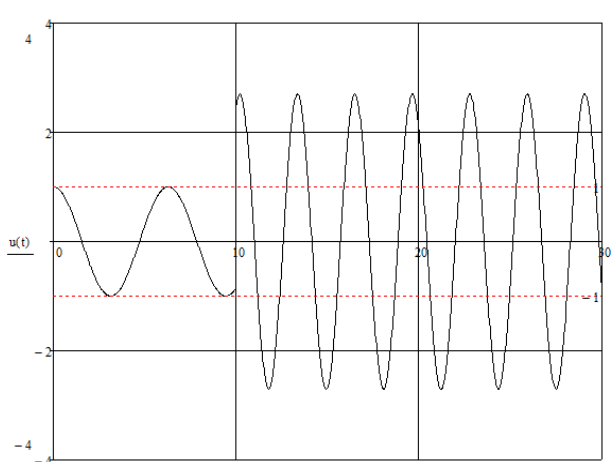


Рис. 4. Зависимость тока от времени для случая разрыва в момент  $I=0,5$

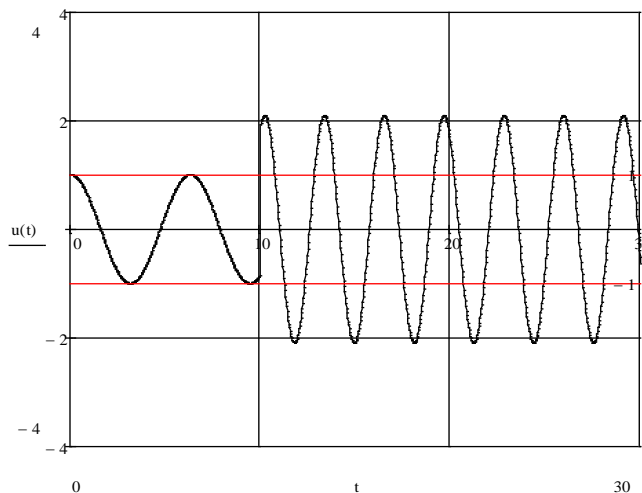


Рис. 5. Зависимость тока от времени для случая разрыва в момент  $I=0$

Из графика на рис. 4 видно, что скачок напряжения составил 2,4 раза по отношению к начальной амплитуде. Из графика на рис. 5 видно, что скачок напряжения составил 2,04 раза по отношению к начальной амплитуде проведено сравнение с аналитическим решением [3],

для случая равенства нулю тока отсечки в момент разрыва, значения возвратного напряжения, полученные численно и аналитически практически совпадают. Полученный результат можно рассматривать как нижнюю границу возвратного напряжения, верхняя граница соответствует решениям [2].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Holms F. An empirical study of current chopping by vacuum arcs / F. Holms // IEEE Power Engineering Society. CRC Press, 2008.
2. Муллин В.В. Простая математическая модель расчёта возвратного напряжения вакуумно дугогасительной камеры как функции тока отсечки / В.В. Муллин // Электронная техника. 2010. Сер.1. СВЧ-Техника. Вып. 3(506).
3. Тамм И.Е. Основы теории электричества / И.Е. Тамм. М.: Наука, 1989. 504 с.
4. Годунов С.К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики / С.К. Годунов // Матем. сб. 1959. Т.47(89). № 3. С. 271-306.

**Муллин Виктор Викторович** –

кандидат технических наук, генеральный директор НПО «Контакт», г. Саратов

**Розов Александр Станиславович** –

студент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

**Максименко Борис Николаевич** –

ведущий инженер ОАО «Тантал», г. Саратов

**Байбурин Вил Бариевич** –

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 621.372

**А.С. Розов, В.Б. Байбурин**

#### **ВЫБОР ЗАТРАВОЧНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ В ИТЕРАЦИОННОМ МЕТОДЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ЛАПЛАСА**

*В работе рекомендован способ задания начального приближения при итерационном решении уравнения Лапласа. основанный на решении одномерных уравнений Лапласа. рассмотрены различные способы задания начального приближения, проведено сравнение способов.*

Уравнение Лапласа, итерационные методы, начальное приближение

**CHOICE OF INITIAL APPROXIMATION FOR ITERATIVE METHOD OF LAPLAS EQUATION SOLVING**

*This work describes some methods of settings initial approximation when solving Laplas question. This work results in a method based on one-dimension Laplas equations solvingю.Discussed various ways of defining an initial approximation, a comparison of methods.*

Laplas equation, iterative method, initial approximation

В [1] рассмотрены три способа задания начального приближения при итерационном решении уравнения Пуассона. В данной работе предложен способ выбора начального приближения для решения уравнения Лапласа, основанный на комбинированном применении второго и третьего способов, изложенных в [1]. Суть способа заключается в том, что для каждого внутреннего узла сетки начальное приближение находится как среднее из решения одномерных уравнений Лапласа, как по горизонталям и вертикалям, так и по диагоналям, пересекающимся в данном узле (рис. 1).

Было проведено сравнение предложенного способа и различных способов задания начального приближения: при одинаковом значении во всех узлах ( $U_{i,j} = 0$ ) [2], и способами, описанными в [1]. Расчёт проводился для типичных областей, связанных с задачами электроники и электротехники, представленных на рис. 2.

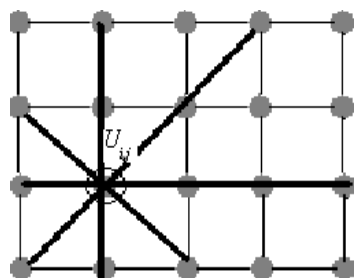


Рис. 1. Схема способа

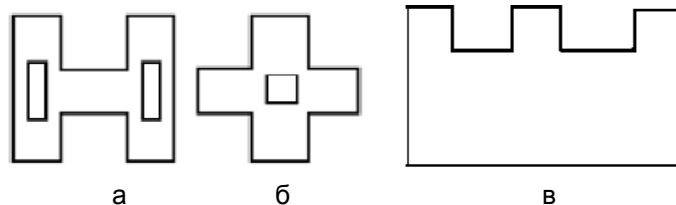


Рис. 2. Расчётные области

При этом на рис. 2 а, 2 б значение  $U$  на внешней границе области равно  $- 5$  В, на внутренней границе  $- 2,5$  В. На рис. 2 в значение на верхней границе составило  $- 5$  В, на нижней  $- 0$  В, на боковых потенциал, менялся линейно от  $0$  В до  $5$  В.

В таблице представлены результаты для, каждой из областей рассчитанные разными способами. На рис. 3 приведены соответствующие зависимости, для случаев рис. 2 а-в. Здесь пунктирная линия соответствует итоговому решению. Сплошные кривые, обозначенные цифрами 1-4, относятся к соответствующим способам выбора затравочного приближения.

Результат сравнения способов

$U_{i,j} = 0$	Способ 2 [1]	Способ 3 [1]	Предложенный способ	Форма
87	199	97	54	рис. 2 а
89	235	44	37	рис. 2 б
122	199	97	64	рис. 2 в



Во всех случаях размерность сетки составляла  $30 \times 30$ . Как следует из данных таблицы, четвёртому способу (предложенному) соответствует минимальное количество итераций. Видно, что во всех рассмотренных случаях затравочное решение, полученное предложенным способом, ближе по форме и абсолютным значениям к итоговому решению.

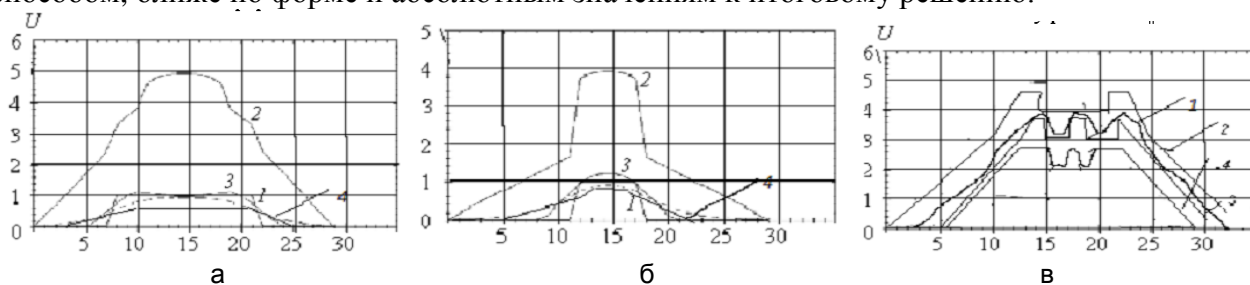


Рис. 3. Графики решений и приближений для каждой из расчётных областей

## ЛИТЕРАТУРА

1. Байбурин В.Б. Выбор затравочного приближения в итерационном решении уравнения Пуассона / В.Б. Байбурин, С.В. Булковский // Вестник СГТУ. 2008. Вып. 3 (54).
2. Турчак Л.И. Основы численных методов / Л.И. Турчак, П.В. Плотников. М.: Физматлит, 2003. 304 с.

**Розов Александр Станиславович** –

студент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

**Байбурин Вил Бариевич** –

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 621.37/.39-027.31

**И.Л. Спицын, В.Б. Байбурин**

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИМ АНАЛИЗАТОРОМ РАСХОДА ПЕСКА И ТВЕРДЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

*Предложена методика определения расхода песка акустическим анализатором частиц. Приведены результаты обработки экспериментальных данных, полученных в лаборатории с помощью разработанной программы, подтвердившие работоспособность методики.*

Методика, акустический анализатор, полосно-пропускающий фильтр

I.L. Spitsyn, V.B. Bayburin

## THE METHOD OF DETERMINING THE FLOW RATE OF SAND AND SOLID INCLUSIONS BY AN ACOUSTIC ANALYZER

*A method of sound flow rate determination using an acoustic particles analyser is offered. Efficacy of the method has been verified by experimental data found by a developed program. Data processing results are cited.*

Procedure, acoustic analyser, bandpass filter

### Введение

В [1] изложен принцип действия акустического анализатора, приведены экспериментальные результаты проверки его основных характеристик. В данной статье предлагается методика определения расхода песка акустическим анализатором. Постановка задачи: имеются текстовые файлы, содержащие в цифровом виде сигналы с приемного датчика акустического анализатора. Полоса пропускания датчика относительно широкая (10 - 400 кГц). В эту полосу, кроме полезного шума, шума песка, попадают побочные технологические шумы самой трубы и шумы от установленного на ней оборудования. Этот шум необходимо отфильтровать.

Опытным путем определено, что шумы трубы и оборудования в большинстве случаев лежат в области частот до 100 кГц, а наиболее характерные шумы от песка – в области от 100 кГц до 400 кГц.

Предлагается найти в спектрах шумов высокой частоты (от 100 кГц) характерные составляющие, в большинстве случаев повторяющиеся, выделить полезные, а также минимизировать влияние вредных.

### Использование цифровых фильтров и методика определения расхода песка

Для решения поставленной задачи создана серия цифровых полосно-пропускающих фильтров для областей высоких частот [2]. Их центральные частоты выбирались исходя из анализа спектральных характеристик записанных сигналов, полученных в лаборатории и на реальных объектах эксплуатации газовых скважин. Также варьируется ширина полосы фильтра. После пропускания через созданные фильтры записанных сигналов получаем информацию, анализируя которую, можно судить о расходе газа и песка в нем. Для анализа этой информации предлагается следующий метод.

Сигнал в цифровом виде представляет массив чисел. Предлагается сложить модули этих чисел. Это будет соответствовать площади, деленной на время. Имеется в виду промежутки времени формирования одной выборки данных. В нашем случае 4096 отсчетов с квантованием по времени 1,6 мкс. Полученное таким образом число названо абстрактным термином «рейтинг». Пропуская файлы с записанными в разных условиях сигналами через эти фильтры, получим некоторое число рейтингов. Предлагается следующий способ анализа полученных рейтингов.

В лаборатории или на реальном объекте необходимо записать сигналы на разных расходах газа и песка или при неизменном расходе газа и разных расходах песка. Далее следует рассортировать файлы по расходу песка, чтобы в каждой группе содержались файлы с одинаковыми расходами. Пропустив одну группу файлов через группу цифровых фильтров и вычислив затем рейтинги, получим двумерный массив рейтингов. Следующим шагом необходимо отобразить эти рейтинги в виде точечной диаграммы, у которой на горизонтальной оси обозначены номера фильтров в их группе, а по вертикали – рейтинг. Таким образом, на диаграмме наиболее характерные и часто повторяющиеся составляющие шумов вызовут появление плотных скоплений точек.

По результатам такого анализа можно выбрать наиболее характерные составляющие для шума песка, создать для их выделения фильтры и использовать соответствующий всему этому ал-

горитм для получения информации о расходе песка, сначала дистанционно, а в перспективе в реальном времени. В данном случае под понятием расхода подразумевается не точное количество песка граммов в минуту, а выяснение той области уровней (например, низкий уровень, средний, высокий), в которой эти расходы лежат.

Ниже приведены результаты обработки данных с помощью специальной программы на основе предложенной методики. На рис. 1 представлен вид окошка терминальной программы. По горизонтальной оси отложены полосно-пропускающие фильтры, по вертикальной оси – распределение величин рейтингов, полученных при пропускании через соответствующий фильтр. Расшифровка фильтров приведена в столбце справа.

Анализируя с помощью данной методики данные, полученные при различных расходах песка можно определить границы распределения рейтингов. По полученному распределению проводить калибровку по расходу песка выносимого из скважины. На первых этапах это будет выглядеть как низкий, средний, высокий уровень расхода песка.

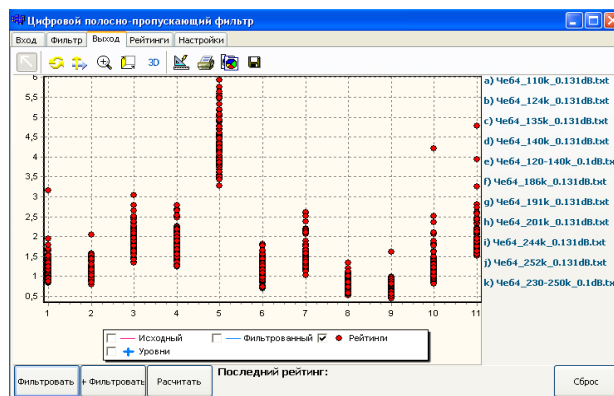


Рис. 1. Распределение рейтингов при пропускании через серию полосно-пропускающих фильтров. Данные получены при расходе песка 15 г/мин

### Заключение

Таким образом, с помощью описанной выше методики представляется возможным производить калибровку акустического анализатора контроля выноса частиц песка. Разработанная методика открывает возможность дальнейшего изучения процессов фильтрации технологических шумов. Планируется доработка методики и программы на ее основе в плане контроля выноса песка в реальном времени.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Байбурин В.Б. Разработка прибора для непрерывного контроля выноса песка и твердых включений из газовых скважин / В.Б. Байбурин, И.Л. Спицын // Приборы и системы: управление, контроль, диагностика. 2009. №10.
2. Джонсон Д. Справочник по активным фильтрам: пер. с англ./ Д. Джонсон, Дж. Джонсон, Г. Мур и др. М.: Энергоатомиздат, 1983. 128 с.

#### **Байбурин Вил Бариевич –**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

#### **Спицын Иван Леонидович –**

аспирант кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

## ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

---

УДК 621.385.623.2

**А.И. Корчагин, А.Ю. Мирошниченко, В.А. Царев**

### **РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХЗАЗОРНЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ МОЩНЫХ МНОГОЛУЧЕВЫХ КЛИСТРОДОВ, РАБОТАЮЩИХ В РЕЖИМЕ УМНОЖЕНИЯ ЧАСТОТЫ**

*Представлены результаты математического моделирования двухззорных резонаторов для мощных многолучевых клистродов, работающих в режиме умножения частоты в промышленном диапазоне.*

Двухззорный резонатор, клистрод, умножитель частоты

**A.I. Korchagin, A.Yu. Miroshnichenko, V.A. Tsarev**

### **THE RESULTS OF NUMERICAL MODELING OF TWO-GAPS CAVITY FOR POWERFUL MULTI-BEAM IOT WORKING AS THE FREQUENCY MULTIPLIER**

*The results of numerical modeling of two-gaps cavity for powerful multi-beam klystrodes working as the frequency multipliers on frequency of 2,45 GHz are described.*

Two-gaps cavity, klystrode, frequency multipliers

В последние годы гибридные приборы – клистроды (ИОТ) широко используются в нижней части СВЧ-диапазона (0,2 - 1,3 ГГц) в качестве мощных высокоэффективных усилителей и генераторов электромагнитных колебаний. Они применяются в ускорительной технике, в телевидении, СВЧ-энергетике [1]. Как правило, клистрод – это однолучевой прибор, в состав которого входят триодная часть с сеточным управлением катодным током, пролетная труба, выходной резонатор и коллектор [2]. Одним из направлений улучшения выходных параметров клистрода является переход к многолучевой конструкции, содержащей группирующую секцию с промежуточным резонатором [3]. Такой прибор, построенный на двухззорных пространственно-развитых резонаторах, получил название тристрод [4]. Он может наиболее эффективно работать в режиме умножения частоты [5]. В этом режиме первичное формирование электронных сгустков в триодной части и их догруппировка в промежуточной секции будет проходить на частоте  $f$ , а отбор энергии в выходном зазоре – на частоте  $kf$ , где  $k$  – коэффициент умножения. Схема прибора представлена на рис. 1.

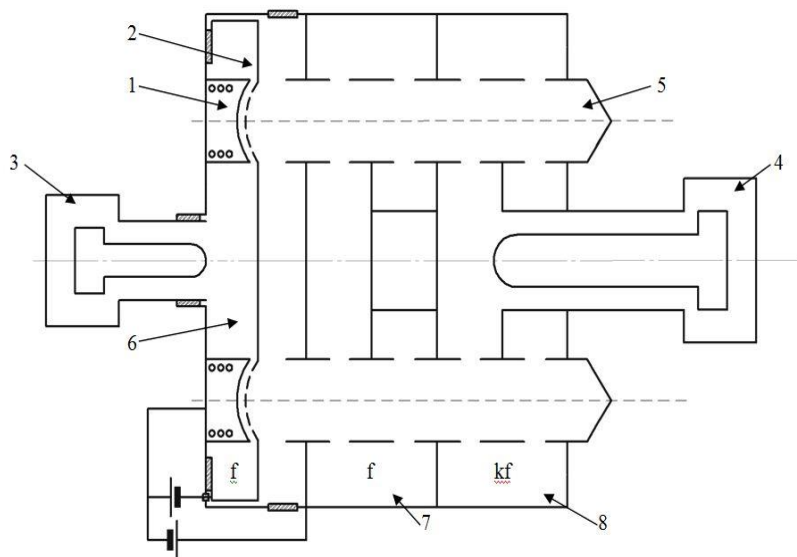


Рис. 1. Конструкции высокоэффективного мощного генератора электромагнитного излучения на основе многолучевого тристода – умножителя частоты: 1 – катод; 2 – сетка; 3 – ввод энергии; 4 – вывод энергии; 5 – коллектор; 6 – входной резонатор; 7 – промежуточный резонатор; 8 – выходной резонатор

Конструкция резонаторов тристода описана в патенте [6]. Такой резонатор может возбуждаться как на основном (противофазном), так и на высших видах колебаний, из которых наибольший интерес представляет синфазный вид. Этот вид колебаний при оптимальном выборе геометрических размеров резонатора может быть настроен на частоту третьей гармоники конвекционного тока. Однако такие режимы работы резонатора ранее не исследовались.

Целью работы является изучение особенностей поведения различных типов колебаний в двухза-

зорных пространственно-развитых цилиндрических резонаторах, анализ возможности использования кратных противофазного и синфазного видов колебаний для создания нового прибора тристода – умножителя частоты с уменьшенными габаритами, массой и высоким КПД. Продольное и поперечное сечения исследуемого резонатора показаны на рис. 2, 3.

Применение аналитических методов для расчета таких резонансных систем затруднено из-за сложной формы и отсутствия аксиальной симметрии. В связи с этим проведено численное моделирование этих резонаторов с применением программы 3D анализа, описанной в [7]. В ходе работы найдены геометрические размеры трех моделей резонаторов, предназначенных для режима умножения частоты  $k = 3$ . Нормированные значения геометрических размеров пространства взаимодействия в трех моделях резонаторов, синтезированных на частоту 2,45 ГГц, приведены в таблице.

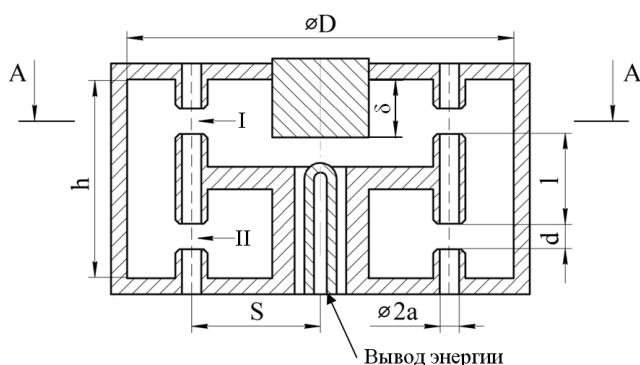


Рис. 2. Продольное сечение резонатора с указанием обозначений основных характерных размеров

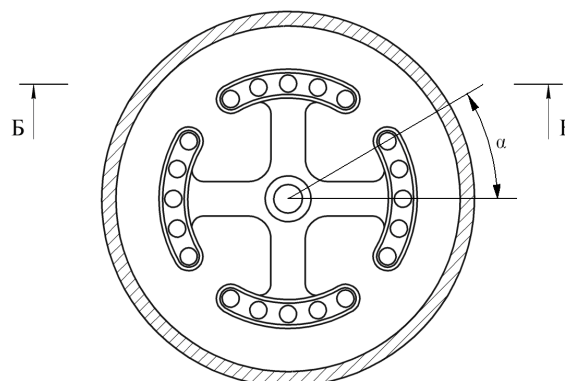


Рис. 3. Вид резонатора в поперечном сечении А-А

Нормированные значения геометрических размеров пространства взаимодействия в трех моделях резонаторов, синтезированных на частоту 2,45 ГГц

Наименование параметра	Значение		
	Модель 1	Модель 2	Модель 3
$l/\lambda$	0,08	0,125	0,155
$d/\lambda$	0,046	0,036	0,03
$a/\lambda$	0,017	0,013	0,01
$D/\lambda$	0,342	0,268	0,222
$S/\lambda$	0,228	0,18	0,148
$h/\lambda$	0,274	0,277	0,281

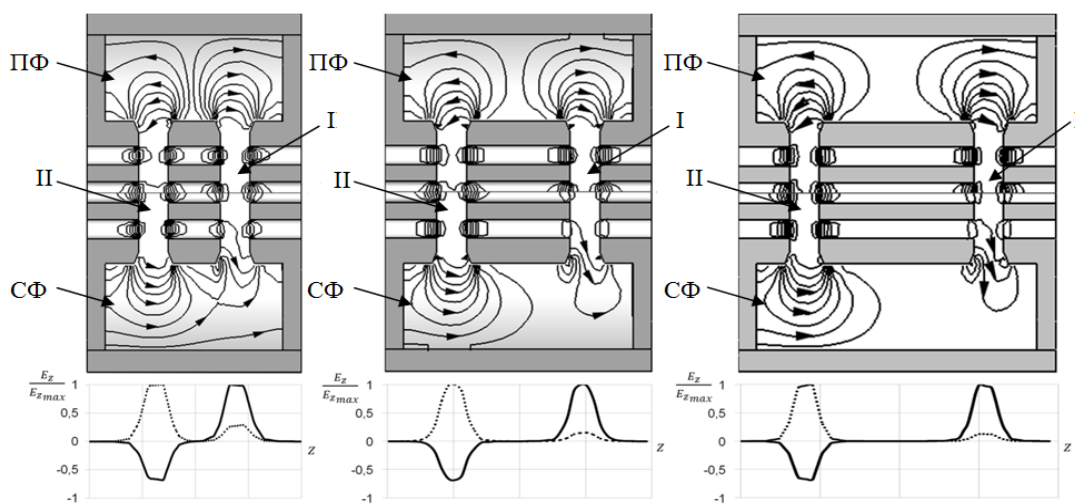


Рис. 4. Силовые линии поля в зазорах резонатора (I и II) на основном – противофазном (ПФ) и на высшем – синфазном (СФ) видах колебаний и зависимости нормированной напряженности электрического поля в зазорах от координаты  $z$  для трех моделей резонаторов в сечении Б-Б

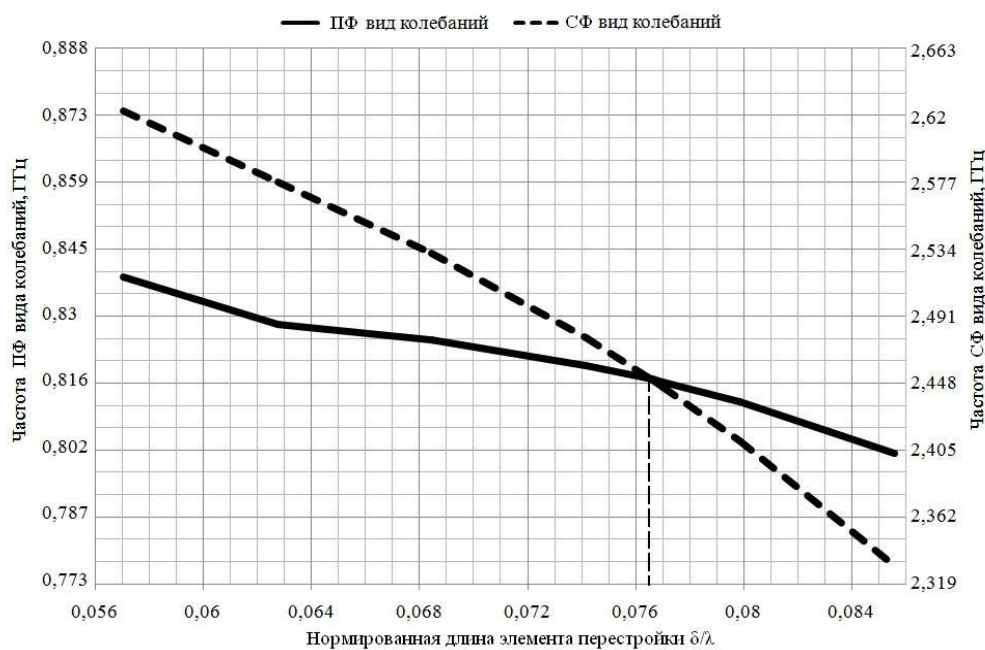


Рис. 5. Зависимости частот противофазного (ПФ) и синфазного (СФ) видов колебаний от нормированной длины элемента перестройки  $\delta/\lambda$

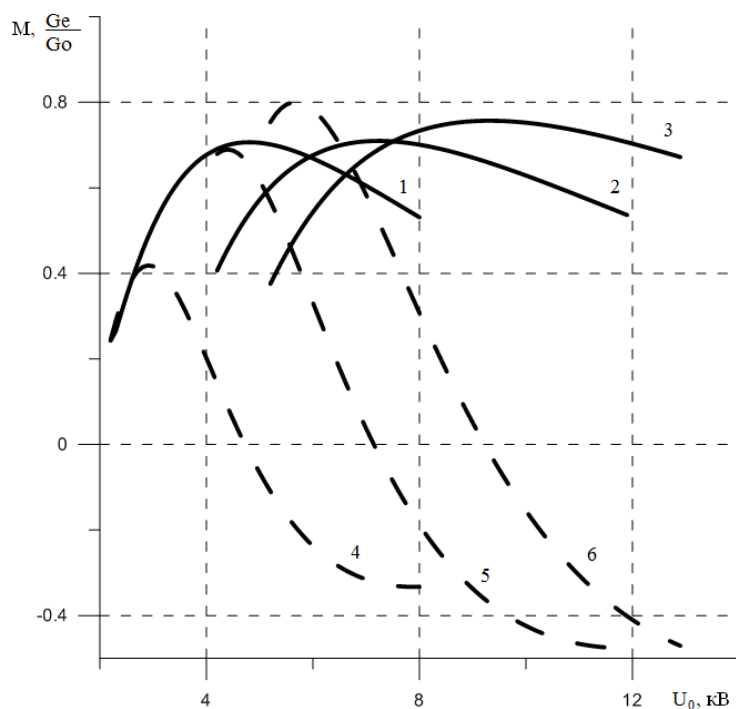


Рис. 6. Зависимости коэффициента связи  $M$  и относительной активной составляющей шунтирующей электронной проводимости  $G_e/G_0$  от ускоряющего напряжения на синфазном виде колебаний: 1, 4 – модель резонатора 1; 2, 5 – модель резонатора 2; 3, 6 – модель резонатора 3  
 ————— — коэффициент связи  $M$ ; - - - - -  $G_e/G_0$

ты можно осуществить перемещением подстроечного элемента. Как видно из графика, приведенного на рис. 5, для модели резонатора 1 оптимальная нормированная длина элемента перестройки  $\delta/\lambda$  равна 0,0765. Это необходимо учитывать при проектировании прибора – умножителя частоты.

Аналогичные расчеты также проведены для резонаторов моделей № 2 - 3, отличающихся длиной втулки  $\ell$ . Для модели №2 с  $\ell/\lambda = 0,125$  оптимальное значение  $\delta/\lambda$  составило 0,1, а для модели № 3 с  $\ell/\lambda = 0,155$  оптимальное значение  $\delta/\lambda = 0,1125$ . Таким образом, с увеличением относительной длины втулки требуется большая емкость перестроечного элемента, зависящая от длины элемента перестройки  $\delta$ .

Для исследуемых моделей проведен расчет электронных параметров взаимодействия: коэффициента связи  $M$  и относительной активной составляющей шунтирующей электронной проводимости  $G_e/G_0$  от ускоряющего напряжения. Результаты приведены на рис. 6.

Эти зависимости позволяют выбрать величину ускоряющего напряжения для конкретной конструкции прибора, рассчитанной на заданную выходную мощность. Например, для модели выходного резонатора 3 оптимальным является ускоряющее напряжение 10 кВ. Считая, что предельный электронный КПД в конструкции такого прибора при работе на высшем виде колебаний составляет 60%, можем оценить его выходную мощность по формуле

$$P_{\text{вых}} = \eta_e \cdot \eta_k \cdot (\rho_{\mu_1} \cdot N_l \cdot 10^{-6}) \cdot U_0^{5/2}, \quad (1)$$

Исследован характер поведения продольной компоненты электрического поля вдоль длины пространства взаимодействия в зависимости от длин центральных электродов (трубок). На рис. 3 показаны силовые линии поля в зазорах резонатора на основном – противофазном и на высшем – синфазном видах колебаний и зависимости нормированной напряженности электрического поля в зазорах от координаты  $z$  для трех моделей резонаторов. Эти результаты показывают, что амплитуды поля в зазорах на синфазном виде колебания различны. Их величины сильно зависят от длины трубок. С увеличением длин трубок амплитуда поля в первом (I) по направлению влета пучка зазоре резонатора уменьшается. В азимутальном направлении изменение электрического поля в разных каналах, находящихся при разных углах  $\alpha$ , не превышает 3%. Точную настройку на кратные частоты

где  $\eta_k$  – контурный КПД;  $\eta_e$  – электронный КПД;  $\rho_{\mu_1}$  – микропервеанс одного луча;  $N_{\mu}$  – число лучей.

Полагая  $\eta_k = 0,95$ ,  $\eta_e = 0,6$ ,  $\rho_{\mu_1} = 0,3 \text{ мкА/В}^{3/2}$ ,  $N_{\mu} = 20$ ,  $U_0 = 10000 \text{ В}$ , получаем  $P_{\text{вых}} = 34,2 \text{ кВт}$ .

В заключение можно сделать следующие выводы: 1) впервые показана возможность реализации режима с кратными резонансными частотами в резонансных системах «древовидного типа» с пространственно разнесенными пролетными втулками; 2) изучены особенности поведения продольной составляющей ВЧ поля для кратных гармоник ( $k = 3$ ) вдоль оси пространства взаимодействия в зависимости от длины втулок и частотного диапазона; 3) данные расчёты позволяют создавать на основе таких систем новые типы высококачественных многолучевых СВЧ-приборов; 4) разработанные принципы конструирования могут быть положены в основу клистродных усилителей и генераторов различного назначения, используемых в СВЧ энергетике, системах связи и телевидении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kowalczyk R.D. Development of a Wideband IOT / R.D. Kowalczyk // Ninth IEEE International Vacuum Electronics Conference. USA, Monterey, 2008. P. 449 – 450.
2. Priest H. The Klystrode, an old idea with new applications / H. Priest // Varian Associates Palo Alto CA. San Francisco, 1987. P. 12-18.
3. Сушков А.Д. Расчет пакетирования электронов в триод-клистроне / А.Д. Сушков, В.К. Федяев // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1967. № 11. С. 89-93.
4. Tsarev, V.A. Analytical Calculations of Efficiency and Comparison with Experimental Data for Inductive Output Tube / V.A. Tsarev, A.Yu. Miroshnichenko // Proceedings IEEE International Vacuum Electronics Conference. Rome, Italy, 2009. P. 375-377.
5. Федяев В.К. Тристрон – утроитель частоты / В. К. Федяев, В. Н. Козлов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 15-й Междунар. Крымской конф. Севастополь, 2005. С. 203-205.
6. Пат. № 2084042. Клистрод / В.А. Царев, А.Ю. Мирошниченко. Приоритет от 29.06.1994, опубл. 10.07.1997.
7. Tsarev V.A. Investigation of the electrodynamic characteristics for double-gap multibeam klystrons cavities / V.A. Tsarev, A.Yu. Miroshnichenko, V.Yu. Muchkaev // Proceedings IEEE International Vacuum Electronics Conference. USA, Monterey, 2010. P. 148-149.

#### **Корчагин Алексей Игоревич –**

студент кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

#### **Мирошниченко Алексей Юрьевич –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

#### **Царев Владислав Алексеевич –**

доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 08.11.10, принята к опубликованию 22.11.10*



УДК 3621.385

**В.А. Сенчуров, В.А. Царев****ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХАЗОРНЫХ МНОГОЛУЧЕВЫХ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗВИТЫХ РЕЗОНАТОРОВ**

*Описываются результаты теоретических и экспериментальных исследований электродинамических характеристик новых типов двухазорных пространственно-развитых резонаторов. Исследуется возможность реализации режима работы с кратными резонансными частотами.*

Двухазорные резонаторы, новые типы резонаторов, многолучевые резонаторы, резонатор на кратные частоты

**V.A. Senchurov, V.A. Tsarev****INVESTIGATION CHARACTERISTICS OF DOUBLE-GAP MULTIBEAM  
SPATIALLY-DEVELOPED CAVITY**

*In this paper we describe the results of theoretical and experimental investigations of electrodynamic characteristics of new type double-gap multibeam spatially-developed cavities. We investigate the possibility of realization the regime of work with divisible resonance frequencies.*

Double-gap cavity, new type cavity, multibeam cavity, cavity with divisible frequencies

**Введение**

Широкая полоса рабочих частот и высокий уровень выходной мощности являются важнейшими требованиями, предъявляемыми к клистродам и клистродам, применяемым в качестве выходных усилителей мощности в передатчиках РЛС и телевизионных передатчиках, работающих в дециметровой части СВЧ диапазона. Эти требования наилучшим образом могут быть реализованы в многолучевых конструкциях приборов [1].

Ширина полосы усиливаемых частот в значительной мере определяется свойствами выходного резонатора многолучевого клистрода. Она может быть оценена с помощью известного выражения:

$$\Delta f / f_0 = M^2 \rho / (N R_{01}),$$

где  $M$  – коэффициент эффективности взаим  $M^2 \rho$  действия;  $\rho$  – характеристическое сопротивление резонатора;  $N$  – число лучей;  $R_{01}$  – сопротивление одного луча по постоянному току.

Из этого выражения следует, что при максимальном электронном КПД для увеличения полосы необходимо повышать характеристическое сопротивление и увеличивать число лучей. Недостатком известных конструкций резонаторов многолучевых приборов с плотной упаковкой лучей в единой пролетной многоканальной трубе является низкое характеристическое сопротивление, падающее с увеличением числа лучей, а также сильная неоднородность ВЧ поля по радиусу пролетной трубы. Эти недостатки ухудшают выходные характеристики многолучевого прибора [2 - 4].

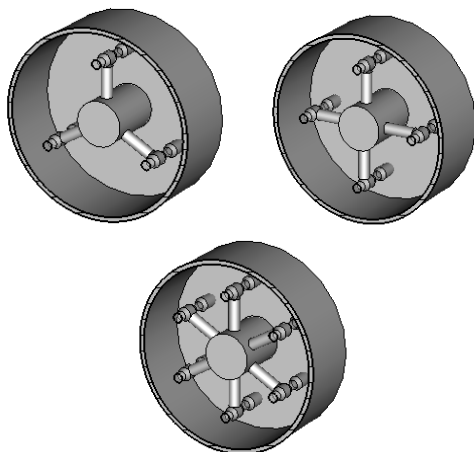


Рис. 1. Модели 3-, 4- и 6- лучевых резонаторов

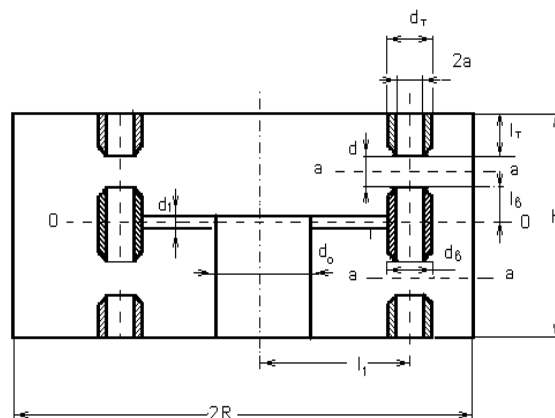


Рис. 2. Поперечное сечение резонатора с указанием основных характерных размеров

В статье описываются результаты теоретических и экспериментальных исследований электродинамических характеристик новых типов двухзазорных пространственно-развитых резонаторов, свободных от указанных выше недостатков. Исследуется возможность реализации режима работы с кратными резонансными частотами.

### Описание конструкции резонаторов древовидного типа

Конструкции пространственно-развитых 3-, 4- и 6- лучевых резонаторов древовидного типа схематически представлены на рис. 1.

Эти резонаторы содержат в одном цилиндрическом корпусе несколько резонансных ветвей, оканчивающихся пролетными втулками. Резонансные ветви имеют вид стержней и крепятся на общем опорном стержне, короткозамкнутом на корпус прибора. Поперечное сечение резонатора с указанием основных характерных размеров приведено на рис. 2.

Применение численных методов для расчета таких резонансных систем затруднено из-за сложной формы и отсутствия аксиальной симметрии. Экспериментально эти резонаторы из-за новизны также не исследованы. В связи с этим проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований по изучению электродинамических свойств новых типов резонаторов.

Исследовались резонаторы прибора со следующими размерами:  $H = 58$  мм,  $d_r = 9$  мм,  $d_1 = 7.4$  мм,  $d_0 = 15$  мм,  $2R = 120$  мм. Пролетные втулки имели пролетные каналы диаметром 6 мм. Перестройка резонаторов могла осуществляться как изменением длин элементарных зазоров, так и введением специального подстроечного элемента (стержня) в максимум электрического поля резонатора. Проведено сравнение результатов эксперимента и численного расчета, проведенного по программе HFSS. На рис. 3, 4 показано изменение частот противофазного и синфазного видов колебаний при изменении относительной длины зазоров  $d/a$ .

Как видно из рис. 3, 4, погрешность численного расчета и экспериментальных исследований не превышает 2%.

Перестройку частоты противофазного вида колебаний можно эффективно осуществлять емкостным элементом в виде стержня (рис. 5). Зависимость удвоенной частоты противофазного вида колебаний и частоты синфазного вида колебаний, соответствующих первой и второй собственным модам резонатора, соответственно, от длины подстроечного емкостного элемента  $Z$ , показана на рис. 6. Зависимость построена для 3-лучевого резонатора. Видно также, что частота синфазного вида колебаний при такой перестройке изменяется слабо по сравнению с противофазным видом.

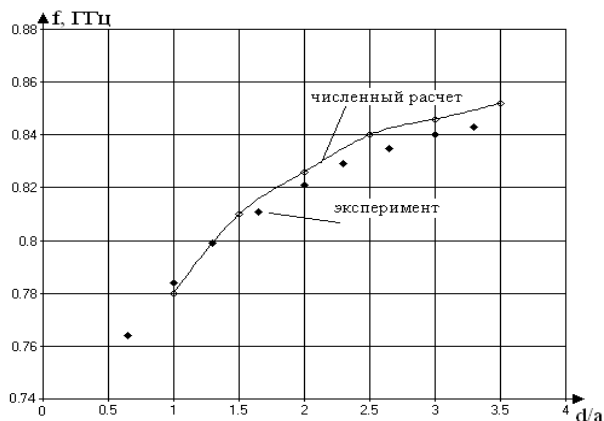


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных и данных численного эксперимента для 3-лучевого резонатора (противофазный вид колебаний)

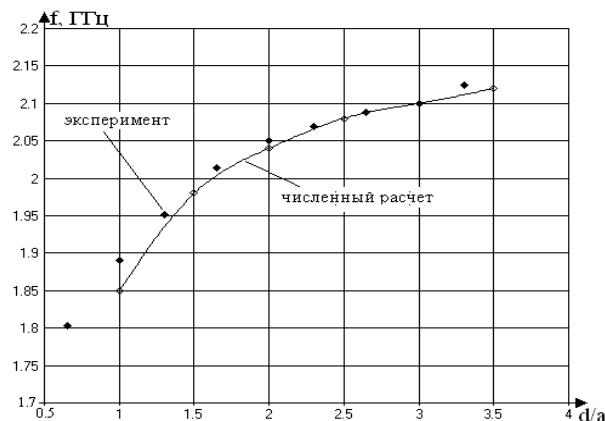


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных и данных численного эксперимента для 3-лучевого резонатора (синфазный вид колебаний)

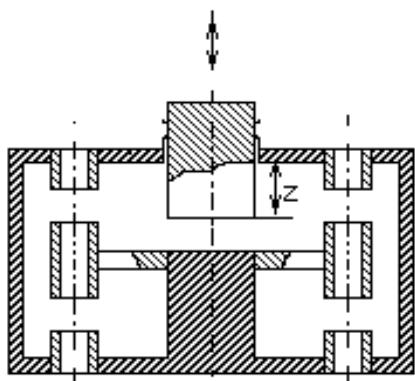


Рис. 5. Поперечное сечение резонатора с емкостным элементом в виде стержня

Произведены расчеты для 6-лучевого двухзорового резонатора. Зависимость удвоенной частоты противофазного вида колебаний и частоты синфазного вида колебаний, соответствующих первой и второй собственным модам резонатора, соответственно, от длины подстроечного емкостного элемента  $Z$ , показана на рис. 7.

Таким образом, как видно из рис. 6 и 7, оптимальным выбором размеров резонаторов и введения емкостного подстроечного элемента удалось подстроить основной противофазный вид колебаний (частота –  $F_1$ ) и синфазный тип колебаний E010 (частота –  $F_2$ ) на кратные резонансные частоты ( $F_2 = 2F_1$ ) для 3- и 6-лучевого двухзоровых резонаторов. При этом можно (так же как и для однолучевых приборов) обеспечить приемлемые условия для взаимодействия пучка с полем одновременно на двух гармониках.

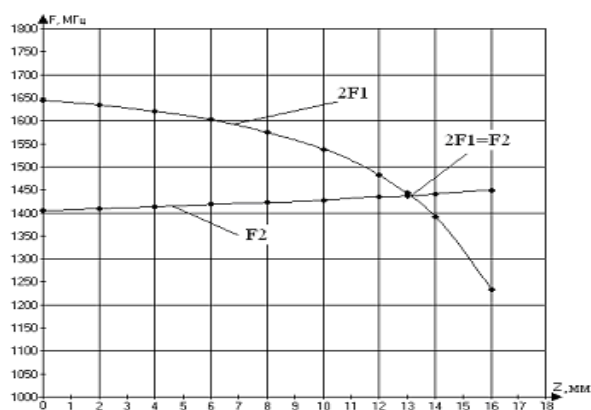


Рис. 6. Сравнение численного расчета частоты противофазного  $F_1$  и синфазного  $F_2$  типов колебаний для 3-лучевого двухзорового резонатора для разных значений длины емкостного подстроечного элемента  $Z$

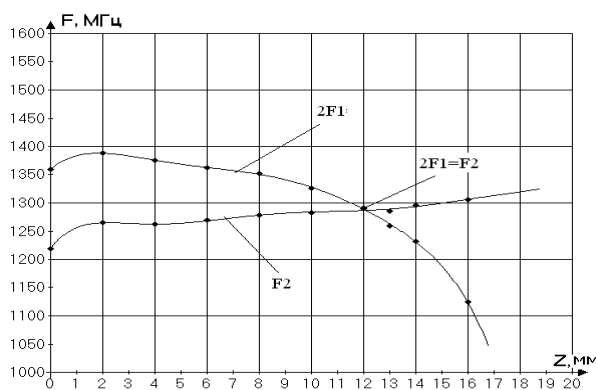


Рис. 7. Сравнение численного расчета частоты противофазного  $F_1$  и синфазного  $F_2$  типов колебаний для 6-лучевого двухзорового резонатора для разных значений длины емкостного подстроечного элемента  $Z$

На рис. 8 показаны зависимости коэффициента эффективности взаимодействия  $M$  (кривые 1 и 2) и активной составляющей электронной проводимости  $G_e/G_0$  (кривые 3 и 4) от полного угла пролета двойного зазора  $\gamma D$  для кратных частот, соответствующих противофазному и синфазному видам колебаний. Из этого рисунка видно, что оптимальный угол пролета для высшего синфазного вида колебаний вдвое больше, чем для основного противофазного вида. Поэтому при углах пролета  $\gamma D > 4.5$  радиан электронная проводимость положительна, как для одного, так и для другого вида колебаний, а коэффициенты взаимодействия достигают максимальных значений.

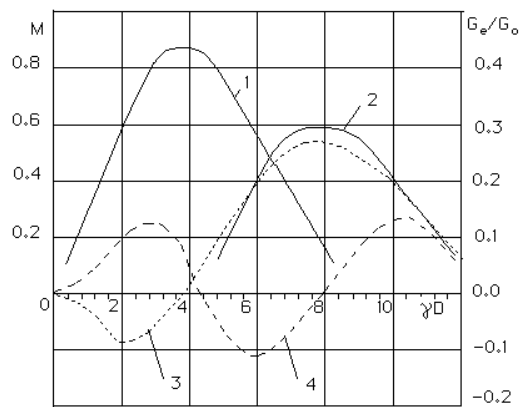


Рис. 8. Зависимости коэффициента эффективности взаимодействия  $M$  (кривые 1 и 2) и активной составляющей электронной проводимости  $G_e/G_0$  (кривые 3 и 4) от полного угла пролета двойного зазора  $\gamma D$  для кратных частот

Далее исследована зависимость частоты основного противофазного типа колебаний и частоты синфазного типа колебаний от числа лучей (рис. 9, 10). Также построена аппроксимирующая функция для частот обоих видов колебаний, позволяющая оценить частоту для резонаторов с числом лучей, отличным от тех, что были просчитаны.

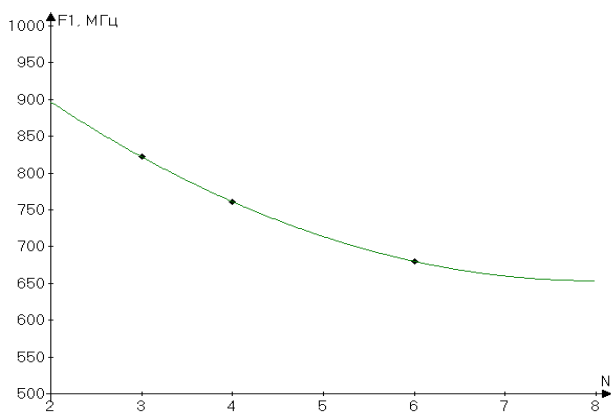


Рис. 9. Аппроксимирующая функция для противофазного вида колебаний  $F1(N)$ :  
 $F1(N) = 6.83N^2 - 108.83N + 1087$

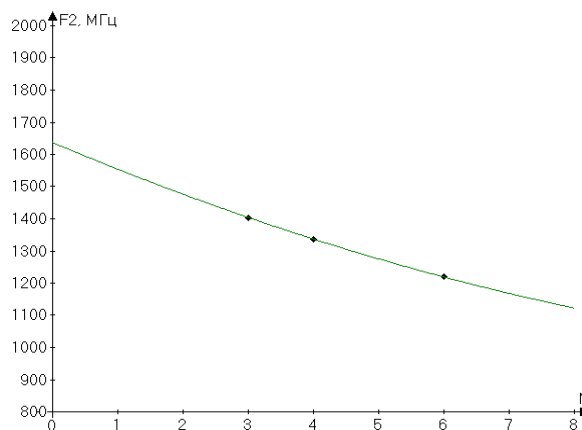


Рис. 10. Аппроксимирующая функция для синфазного вида колебаний  $F2(N)$ :  
 $F2(N) = 2.67N^2 - 85.67N + 1637$

### Заключение

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования доказали возможность реализации режима с кратными резонансными частотами в таких резонаторах. Исследована зависимость частоты основного противофазного типа колебаний и частоты синфазного типа колебаний от числа лучей, построены аппроксимирующие функции.

Это открывает возможности создания на основе таких резонаторных систем новых типов высококачественных многолучевых СВЧ-приборов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пчелинцев Г.А. Перспектива применения клистронов для целей СВЧ энергетики / Г.А. Пчелинцев, Д.А. Сальникова, В.А. Царев // Радиотехника и связь: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов, 2005. С. 382-385.

2. Tsarev V. A. Investigation of the electrodynamic characteristics for double-gap multi – beam klystrons cavities / Tsarev, V.A., A.Y. Miroshnichenko, V.Y. Muchkaev // Proceedings IEEE International Vacuum Electronics Conference. US, Monterey, CA 93940, 18-20 May, 2010. P.148.

3. High-power, high-efficiency klystrons for industrial heating / Arai Shintaro, Maruyama Yoshifumi, Tomikawa Kunihiro, Makino Toshimoto // NEC Res. and Dev. 1995. 36. №3. С. 400 – 405.

4. Пат. SU 1376828 A1 Н 01 J 23/18. Резонатор СВЧ-прибора / В.Г. Андреев, Н.В. Андреев, В.М. Белугин и И.А. Сытченко, 07.10.91. Бюл. №37.

**Сенчуров Виктор Андреевич** –

аспирант кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

**Царев Владислав Алексеевич** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 08.11.10, принята к опубликованию 22.11.10*

УДК 3621.385

**В.Ю. Мучкаев, В.А. Царев**

### **РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КЛИСТРОННЫХ РЕЗОНАТОРОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ С ПОМОЩЬЮ ТРЕХМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

*Предложена методика численного электродинамического расчета характеристического сопротивления клистронных резонаторов сложной формы. Приведено сравнение расчетных и экспериментальных данных для резонансной частоты и характеристического сопротивления двухззорного резонатора с противофазным видом колебаний в зависимости от значений геометрических размеров резонатора.*

Характеристическое сопротивление, двухззорный резонатор, метод конечных разностей

**V.Y. Muchkaev, V.A. Tsarev**

### **CALCULATION OF CHARACTERISTIC IMPEDANCE OF KLYSTRONS CAVITY WITH IRREGULAR SHAPE BY MEANS OF THREE-DIMENSIONAL ELECTRODYNAMIC MODEL**

*The method of numerical calculation of characteristic impedance of the resonator is offered. Comparison settlement and experimental data for resonant frequency and characteristic impedance of the double-gap cavity with an antiphase kind of fluctuations depending on values of the geometrical sizes of the resonator is resulted.*

Characteristic impedance, double-gap cavities, method of final differences

В усилительных клистронах дециметрового диапазона широко применяются резонаторы с областью взаимодействия в виде двойного зазора с противофазным напряжением. Такие резонаторы позволяют не только улучшить электрические характеристики клистронов, но и в ряде случаев существенно уменьшить их габариты и массу. Однако двухзазорные резонаторы имеют довольно сложную геометрическую форму и, следовательно, аналитический расчет параметров таких резонаторов затруднителен. Особенно затруднительно рассчитать такой важный параметр резонаторов, как характеристическое сопротивление. В связи с этим в статье предложена численная методика расчета характеристического сопротивления резонаторов и произведен расчет характеристического сопротивления двухзазорных резонаторов.

Характеристическое сопротивление для резонаторов с бессеточным зазором можно представить в виде отношения [1]

$$\rho = \frac{R}{Q} = \frac{|V_1|^2}{2\omega U} = \frac{\left(\int_{-\infty}^{\infty} |E_z| dz\right)^2}{2\omega \int (\varepsilon_0 E^2 + \mu_0 H^2) dv}, \quad (1)$$

где  $R$  – резонансное сопротивление эквивалентного параллельного контура;  $Q$  – добротность резонатора;  $V_1$  – ВЧ напряжение, действующее на пучок;  $\omega$  – круговая частота колебаний электромагнитного поля;  $U$  – энергия электромагнитного поля;  $E_z$  –  $z$ -я компонента напряженности электрического поля;  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  Г/м.

Для расчета интегралов в выражении (1) необходимо знать распределение поля в резонаторе. Однако для резонаторов со сложной геометрической формой аналитический расчет распределения поля является порой неразрешимой задачей.

Поэтому распределение поля в резонаторе искалось при помощи численных методов расчета. Основой для численного анализа выбран метод конечных разностей [2], основанный на аппроксимации дифференциальных уравнений Максвелла конечно-разностными уравнениями, а непрерывных функций распределения поля – дискретными сеточными функциями, значения которых определены в узлах сетки, покрывающих расчетную резонансную область. Причем значения различных составляющих электрического и магнитного полей определяются в узлах сеток, сдвинутых друг относительно друга на половину шага сетки  $h/2$ . При расчетах использована регулярная сетка, ячейки которой имеют вид параллелепипедов.

С учетом этого для вычисления компонент электрического поля в ячейке сетки  $(i, j, k)$  можно записать следующие уравнения:

$$\begin{aligned} E_x^t(i + \frac{1}{2}, j, k) &= E_x^{t-1}(i + \frac{1}{2}, j, k) + \frac{h_t}{\varepsilon_0 h_y} \left( H_z^{t-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - \right. \\ &\quad \left. - H_z^{t-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) \right) - \frac{h_t}{\varepsilon_0 h_z} \left( H_y^{t-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - H_y^{t-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2}) \right), \\ E_y^t(i, j + \frac{1}{2}, k) &= E_y^{t-1}(i, j + \frac{1}{2}, k) - \frac{h_t}{\varepsilon_0 h_x} \left( H_z^{t-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - \right. \\ &\quad \left. - H_z^{t-\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) \right) + \frac{h_t}{\varepsilon_0 h_z} \left( H_x^{t-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - H_x^{t-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2}) \right), \\ E_z^t(i, j, k + \frac{1}{2}) &= E_z^{t-1}(i, j, k + \frac{1}{2}) + \frac{h_t}{\varepsilon_0 h_x} \left( H_y^{t-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - \right. \\ &\quad \left. - H_y^{t-\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) \right) + \frac{h_t}{\varepsilon_0 h_y} \left( H_x^{t-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - H_x^{t-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) \right), \end{aligned}$$

где  $t = 1, 2, \dots, K$  ( $K$  – общее число шагов по времени),  $h_t$  – шаг по времени;  $h_x, h_y, h_z$  – шаги сетки вдоль осей  $ox, oy$  и  $oz$ , соответственно.

Для компонент магнитного поля конечно-разностные уравнения записываются аналогичным образом. Необходимо только учесть, что магнитное поле рассчитывается для момента времени  $t + \frac{1}{2}$ .

Шаг по времени  $h_t$  должен удовлетворять условию устойчивости Куранта [3]:

$$h_t = \alpha \cdot n_{\max} / c \sqrt{1/h_x^2 + 1/h_y^2 + 1/h_z^2}, \quad (2)$$

где  $\alpha < 1$  – коэффициент устойчивости;  $n_{\max}$  – максимальный коэффициент преломления среды, заполняющей расчетную область.

Задача решалась при предположении, что стенки резонаторов сделаны из материалов, имеющих высокую проводимость. Поэтому при численном моделировании рассматривались граничные условия для совершенных проводников:

$$n \cdot E = \rho_s, \quad n \times E = 0, \quad n \cdot H = 0, \quad n \times H = J_s,$$

где  $n$  – нормаль к стенке резонатора;  $\rho_s$  – поверхностная плотность зарядов;  $J_s$  – поверхностная плотность тока.

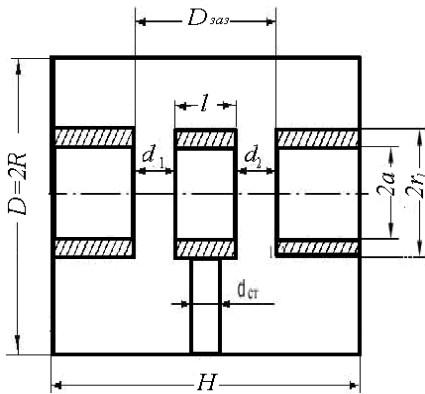


Рис. 1. Поперечное сечение исследуемого резонатора

Описанная методика расчета позволяет определять численные значения всех компонент электромагнитного поля резонатора любой геометрической формы и в любой момент времени, а следовательно, и вычислять все интересующие разработчика параметры резонаторов, не имеющих аксиальной симметрии.

Рассмотрим двухзазорный цилиндрический клистронный резонатор с противофазным видом колебаний, конструкция которого показана на рис. 1.

На рис. 2 приведены расчетные и экспериментальные зависимости частоты основного вида колебаний и усредненного по радиусу пролетного канала характеристического сопротивления резонатора от относительной длины зазора для случая  $d_1=d_2=d$  при  $r_1/a=1.5$ ;  $l/a=3$ ;  $H/a=8.56$ ;  $R/a=5$ ;  $d_{cr}/a=0.15$ . Длина зазора изменялась уменьшением длин пролетных труб, торцы которых определяют полную длину двойного зазора  $D_{заз}$ . При этом длина центральной втулки  $l$  оставалась неизменной.

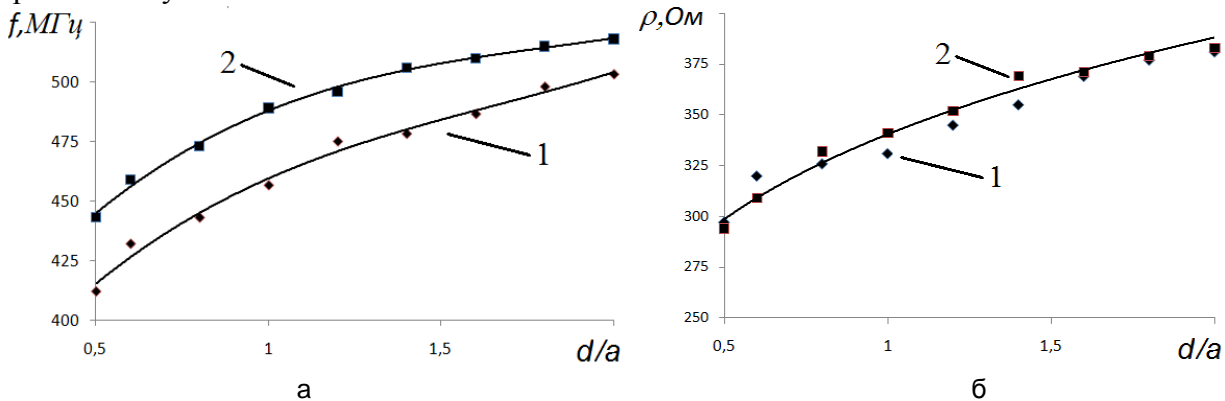


Рис. 2. Изменение частоты противофазного вида колебаний (а) и характеристического сопротивления (б) резонатора при изменении относительной длины зазора  $d/a$ : 1 – численный расчет; 2 – экспериментальные данные

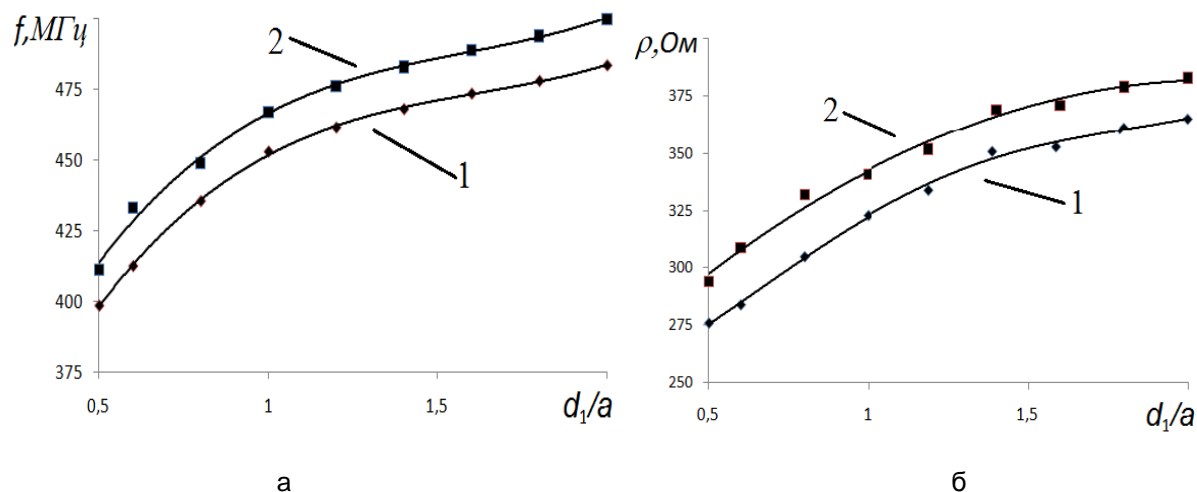


Рис. 3. Изменение частота противофазного вида колебаний (а) и характеристического сопротивления (б) резонатора при изменении относительной длины зазора  $d_1/a$ :  
1 – численный расчет; 2 – экспериментальные данные

В эксперименте характеристическое сопротивление определялось известным методом возмущений по смещению собственной частоты резонатора, вызванному введением небольшого возмущающего тела.

На рис. 3 приведено изменение частоты колебаний СВЧ поля и характеристического сопротивления резонатора с разными длинами зазоров  $d_1 = 2d_2$ . В целом зависимости частоты колебаний и характеристического сопротивления резонатора от длины зазора имеют аналогичный характер, что и в случае резонатора с одинаковыми длинами зазоров.

Из этих графиков видно, что погрешность предложенной методики расчета не превышает 5%. Следует отметить, что обычно оптимальная длина зазора выбирается исходя из условия получения максимума произведения  $\rho M^2$ , где  $M$  – коэффициент эффективности взаимодействия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Caryotakis G. (2005). High-power klystrons: theory and practice at the Stanford linear accelerator center.
2. Karl S. Kunz, Raymond J. Luebbers (1993). The finite difference time domain method for electromagnetics.
3. Григорьев А.Д. Электродинамика и микроволновая техника : учебник / А.Д. Григорьев. . 2-е изд., доп. СПб.: Лань, 2007. 704 с.

**Мучкаев Вадим Юрьевич** –

аспирант кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

**Царев Владислав Алексеевич** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 08.11.10, принята к опубликованию 22.11.10*



**Б.К. Сивяков, О.С. Аврясова**

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**

*Проанализировано влияние интенсивного использования электрической и магнитной энергии на окружающую среду и здоровье человека. Оценены перспективы проекта «Математическое моделирование электромагнитного поля электроустановок». Приведен конкретный пример расчета потенциала и напряженности электрического и магнитного полей воздушной трехпроводной линии электропередачи высокого напряжения.*

Электромагнитное поле, электроустановки, воздушные линии электропередач

**B.K. Sivyakov, O.S. Avryasova**

## **MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC FIELD ELECTRIC**

*The article analyzes the impact of the intensive use of electric and magnetic energy on the environment and human health. The prospects of the project «Mathematical modeling of electromagnetic fields of electrical installations». Concrete examples of calculation of the potential and the electric and magnetic fields, air three-wire high voltage power lines.*

The electromagnetic field, electrical installation, overhead power line

Интенсивное использование электромагнитной и электрической энергии в современном информационном обществе привело к возникновению и формированию нового значимого фактора загрязнения окружающей среды – электромагнитного. В настоящее время признано, что электромагнитное поле искусственного происхождения является важным значимым экологическим фактором с высокой биологической активностью. Анализ планов отраслей связи, передачи и обработки информации, транспорта и ряда современных технологий показывает, что в ближайшем будущем будет нарастать использование технических средств, генерирующих электромагнитную энергию в окружающую среду.

С начала 1990-х годов произошли изменения в структуре источников электромагнитного поля (ЭМП), связанные с возникновением их новых видов (сотовой и других видов персональной и мобильной коммуникации), освоением новых частотных диапазонов теле- и радиовещания, развитием средств дистанционного наблюдения и контроля и т.д. Особенностью этих источников является создание равномерной зоны «радиопокрытия», что является нечем иным, как увеличением электромагнитного фона в окружающей среде.

Для решения вышеобозначенных проблем создан проект «Математическое моделирование электромагнитного поля электроустановок», который представляет собой интерактивную полностью автоматизированную инженерную систему трёхмерного электротехнического анализа и расчёта электромагнитного поля (ЭМП), создаваемого электроустановками различного напряжения и частоты (такими как воздушные и кабельные линии, трансформаторные подстанции, распределительные пункты, радиостанции, станции сотовой связи и т. д.), позволяющую осуществить ввод/импорт и редактирование исходных данных, автоматизиро-

ванный расчет и последующий вывод результатов в табличном и графоаналитическом виде с ссылками на соответствующие нормативные документы. В случае превышении норм ЭМП, формируются рекомендуемые мероприятия по снижению поля до допустимых значений, в зависимости от близ расположенных объектов.

Проект предназначен для организаций, занимающихся строительством, экспертизой и проектированием в области электроэнергетики, а также программа будет полезна для любого гражданина РФ (для оценки ЭМП, создаваемого кабелями спутникового телевидения, сети Интернет, линий электропередачи и т.д., проходящих рядом с жилым помещением).

На данный момент полностью решена задача расчёта картины распределения электрического и магнитного поля трёхпроводной воздушной линии электропередачи высокого напряжения.

По известной высоте подвеса и расстоянию между крайними фазами, а также заданному напряжению линии и радиусу токопровода необходимо вычислить потенциал, создаваемый проводами.

Для решения задачи использовался метод зеркальных отображений.

Потенциал точки пространства с координатами  $(x, y)$   $T$ :

$$\left| \varphi_T \right| = \varphi_{T1} + \varphi_{T2} + \varphi_{T3} = \frac{1}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \left( \tau_1 \ln \frac{b_{1T}}{a_{1T}} + \tau_2 \ln \frac{b_{2T}}{a_{2T}} + \tau_3 \ln \frac{b_{3T}}{a_{3T}} \right), \quad (1)$$

где  $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ ,  $\Phi / м$  – электрическая постоянная;  $\epsilon_r = 1$  – относительная диэлектрическая проницаемость для вакуума и воздуха;  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  – линейный заряд провода (заряд единицы длины), Кл/м;  $a_{kT} = \sqrt{(x-d_k)^2 + (y-h_k)^2}$  – расстояние от точки  $T(x, y)$  до  $k$ -го провода,  $k=1..3$ ;  $b_{kT} = \sqrt{(x-d_k)^2 + (y+h_k)^2}$  – расстояние от точки  $T(x, y)$  до зеркального изображения  $k$ -го провода,  $k=1..3$ ;  $h_k$  – высота подвеса фазного провода;  $d_1$  – расстояние от фазного провода до оси опоры.

Запишем первую группу уравнений Максвелла, связывающих потенциал с линейным зарядом в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varphi_{m1} &= \alpha_{11}\tau_1 + \alpha_{12}\tau_2 + \alpha_{13}\tau_3; \\ \varphi_{m2} &= \alpha_{21}\tau_1 + \alpha_{22}\tau_2 + \alpha_{23}\tau_3; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\varphi_{m3} = \alpha_{31}\tau_1 + \alpha_{32}\tau_2 + \alpha_{33}\tau_3,$$

где  $\alpha_{kn}, \alpha_{kk}$  – потенциальные коэффициенты,  $\alpha_{kn} = \gamma \ln \frac{b_{kn}}{a_{kn}}$ ,  $n \neq k$ ,  $a_{kn} = \sqrt{(d_k - d_n)^2 + (h_k - h_n)^2}$  – расстояние между  $k$ -м и  $n$ -м проводами;  $b_{kn} = \sqrt{(d_k - d_n)^2 + (h_k + h_n)^2}$  – расстояние между  $k$ -м проводом и зеркальным отражением  $n$ -го провода. Здесь было учтено свойство потенциальных коэффициентов  $\alpha_{kn} = \alpha_{nk}$ .

Решая систему (2) относительно неизвестных  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ , получим

$$\tau_1 = \frac{A_1\varphi_{m1} + A_4\varphi_{m2} + A_5\varphi_{m3}}{A_1\alpha_{11} + A_4\alpha_{12} + A_5\alpha_{13}}; \quad \tau_2 = \frac{A_4\varphi_{m1} + A_2\varphi_{m2} + A_6\varphi_{m3}}{A_1\alpha_{11} + A_4\alpha_{12} + A_5\alpha_{13}}; \quad \tau_3 = \frac{A_5\varphi_{m1} + A_6\varphi_{m2} + A_3\varphi_{m3}}{A_1\alpha_{11} + A_4\alpha_{12} + A_5\alpha_{13}}. \quad (3)$$

где  $A_1 = \alpha_{22}\alpha_{33} - \alpha_{23}^2$ ;  $A_2 = \alpha_{11}\alpha_{33} - \alpha_{13}^2$ ;  $A_3 = \alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}^2$ ;  $A_4 = \alpha_{13}\alpha_{23} - \alpha_{12}\alpha_{33}$ ;  $A_5 = \alpha_{12}\alpha_{23} - \alpha_{13}\alpha_{22}$ ;  $A_6 = \alpha_{12}\alpha_{13} - \alpha_{11}\alpha_{23}$ .

Потенциалы проводов, выраженные через линейное напряжение:

$$\varphi_{m1} = \dot{U}_{m1\phi} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\lambda}}{\sqrt{3}} e^{j\psi_1}; \quad \varphi_{m2} = \dot{U}_{m2\phi} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\lambda}}{\sqrt{3}} e^{j\psi_2}; \quad \varphi_3 = \dot{U}_{3\phi} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\lambda}}{\sqrt{3}} e^{j\psi_3}. \quad (4)$$

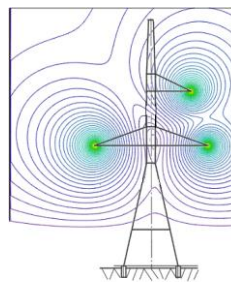


Рис. 1. Картина эквипотенциалей ЛЭП

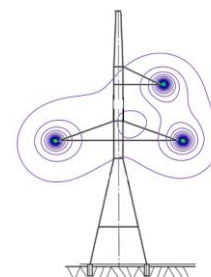


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля ЛЭП

Здесь  $\dot{U}_{mk\varphi}$  – комплекс амплитудного напряжения  $k$ -й фазы;  $U_L$  – линейное напряжение;  $\psi_k$  – фаза  $k$ -го фазового напряжения. Фазовое напряжение отсчитывается относительно земли. Вычисления произведены в программе Mathcad 14. На рис. 1 представлена картина эквипотенциалей ЛЭП с шагом 0,96 кВ.

Таким образом, аналитически решена задача нахождения распределения потенциала относительно земли для трёхпроводной линии электропередачи с произвольными координатами подвеса проводов.

Кроме распределения потенциала для обеспечения ЭМС, представляет интерес расчёт напряженности электрического поля.

$$\vec{E}(x, y) = -grad\varphi = -\vec{i} \partial\varphi/\partial x - \vec{j} \partial\varphi/\partial y. \quad (5)$$

Для вычисления напряженности переходим от векторной записи уравнения к скалярной:

$$E(x, y) = \sqrt{(\partial\varphi/\partial x)^2 + (\partial\varphi/\partial y)^2}. \quad (6)$$

На рис. 2 представлено распределение напряженности электрического поля ЛЭП с шагом 3,753 кВ/м.

Полученные результаты позволяют прогнозировать величину потенциала и напряженности электрического поля высоковольтных ЛЭП для ЭМС технических средств и безопасности биоэкосистем.

**Сивяков Борис Константинович** –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета

**Аврясова Ольга Сергеевна** –

аспирантка кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 08.11.10, принята к опубликованию 22.11.10*

УДК 621.311.019.3

**Д.С. Левин, А.В. Карнаух, Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРОЗОЗАЩИТНОГО ТРОСА В КАЧЕСТВЕ РЕЗЕРВНОЙ ФАЗЫ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

*Использование грозозащитного троса, как резервной фазы, на воздушных линиях электропередачи позволит производить плавку отложений, не отключая линию, и дает возможность сохранения электроснабжения потребителя. В программе Matlab (Simulink) разработана электродинамическая модель и проанализированы параметры энергосистемы, при использовании грозозащитного троса в качестве резервной фазы.*

Резервная фаза, грозозащитный трос, четвертый провод, гололедно-изморозевые отложения, воздушная линия электропередачи

D.S. Levin, A.V. Karnauh, D.A. Virihanov, G.G. Ugarov

## USING OF A HAWSER, AS RESERVE PHASE, ON OVERHEAD TRANSMISSION LINES

*Using of a ground wire, as reserve phase, to phase fuse of glaze-wind depositions on overhead transmission lines allowing performing the fuse of the depositions not disconnecting line gave an opportunity of saving power consumers supply. In program Matlab (Simulink) was developed electrodynamic simulation model of overhead transmission lines and was analyzed parameters of power system, when we use of the hawsers, as reserve phase.*

Reserve phase, ground wire, fourth wire, glaze-wind depositions, overhead transmission line

Надежная работа ВЛЭП существенно определяет надежность работы всей энергосистемы, т.к. доля всех отказов ВЛ в отказах оборудования энергетических систем составляет 35 - 50%. Обычно достижение необходимого уровня надежности осуществляется за счет резервирования элементов объекта.

При этом более 50% всех повреждений ВЛ и, соответственно, более 60% продолжительности всех аварийных отключений, происходит в результате метеорологических воздействий в виде аварийно-опасных гололедно-ветровых нагрузок, охватывающих большие территории и приводящие к обрывам проводов и грозозащитных тросов, поломке арматуры, опор из-за чего происходит снижение надежности электроснабжения, несущее зачастую большой материальный ущерб. Так, толщина гололеда на высоковольтных линиях электропередач может достигать 60-70 мм, существенно утяжеляя провода. Например, провод марки АС-185/43 диаметром 19,6 мм километровой длины, имеющий массу 846 кг, при толщине гололеда 20 мм увеличивает её в 3,7 раза, при толщине 40 мм – в 9 раз, при толщине 60 мм – в 17 раз. При этом общая масса линии электропередачи из семи проводов километровой длины возрастает соответственно до 25, 60 и 115 тонн, что в большой вероятности приводит к обрыву проводов и поломке металлических опор [1].

Длительность действия гололедно-ветровых нагрузок составляет 0,03 - 0,5% от полного срока эксплуатации ВЛ, поэтому активное воздействие на гололедно-изморозевые отложения на проводах и грозозащитных тросах ВЛ плавкой их переменным или постоянным током, позволяющей избавиться от отложений на десятках километров линии, является наиболее эффективным средством. Временные затраты в среднем на плавку составляют от 0,5 до 1 часа на провод.

Наиболее простой и удобный способ плавки отложений – метод короткого замыкания, но при этом, как правило, приходится отключать всю линию, нарушая надежность электроснабжения. Применение резервной фазы позволит производить пофазную плавку, не отключая линию, сохранив электроснабжение потребителя.

В качестве резервной фазы предполагается рассмотрение грозозащитного троса с обеспечением необходимого уровня его изоляции, причем в грозовой сезон трос используется по своему основному функциональному назначению – для защиты ВЛ от поражений молнией, а при однофазных повреждениях, пофазном ремонте, пофазной плавке гололедно-изморозевых отложений используется как резервный провод для передачи электроэнергии. К тому же даже при двухфазных повреждениях остается возможность, хоть и частично, сохранить электроснабжение потребителя переводением линии в неполнофазный режим работы. Возможность такого решения представлена на рис. 1.

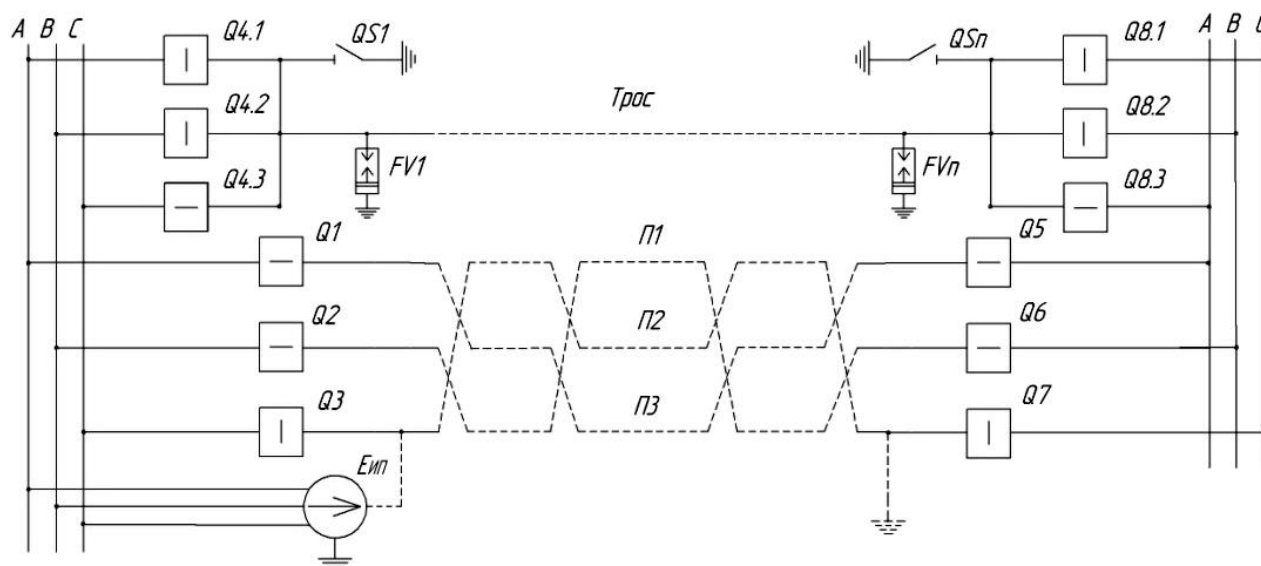


Рис. 1. Схема использования грозотроса в качестве резервной фазы:  
 Еип – ЭДС источника плавки отложений; QS1-QSn – заземляющий разъединитель;  
 Q1-Q8.3 – выключатель; FV1-FVn – разрядник; П1-П3 – фазный провод

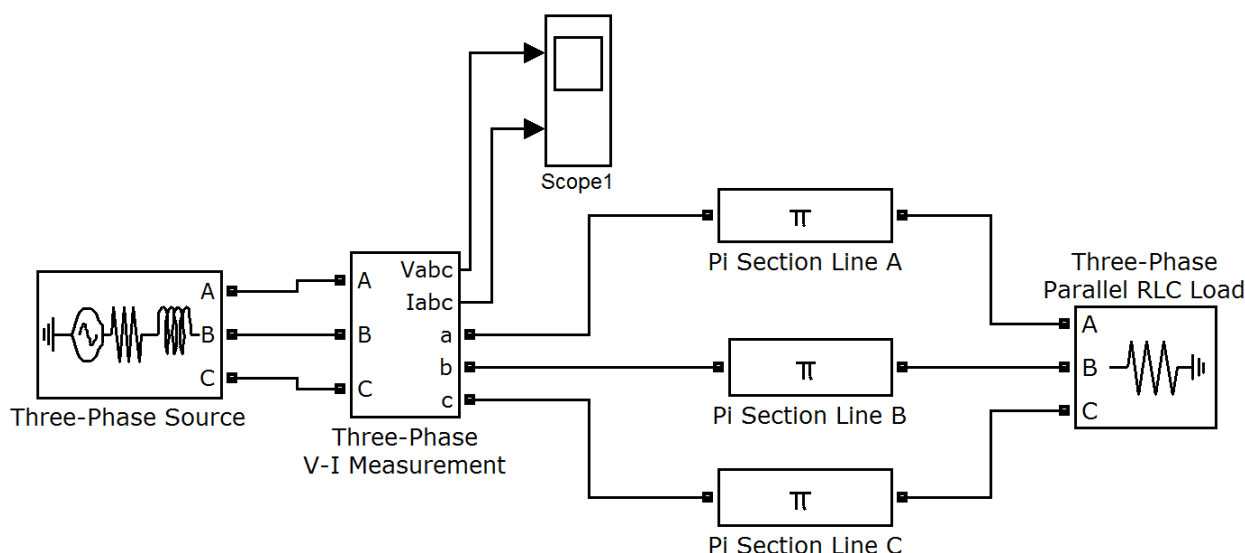


Рис. 2. Электродинамическая модель линии электропередачи

Для анализа влияния грозотроса как фазного провода на параметры режима работы ВЛ было проведено исследование, в процессе которого использовался программный пакет для компьютерного моделирования Matlab и сопутствующая ей программа Simulink со входящей в нее библиотекой SimPowerSystems.

На начальном этапе в пакете Matlab разработана математическая модель воздушной линии электропередачи и в программе Simulink смоделирована электродинамическая модель, представленная на рис. 2. Принципиальная схема модели в Simulink состоит из следующих блоков: 1) блок 3-Phase Source моделирует трехфазный источник напряжения; 2) блок Three-Phase V-I Measurement выполняет измерение токов и напряжений в трехфазных цепях; 3) окно блока Scope отображает графики сигналов; 4) блок PI Section Line моделирует однофазную линию электропередачи с сосредоточенными параметрами; 5) блок 3-Phase Parallel RLC Load моделирует трехфазную цепь, состоящую из трех параллельных RLC-нагрузок.

В качестве грозозащитных тросов на линиях 110 кВ применяются стальные канаты сечением 50 мм<sup>2</sup>. Следует заметить, что у стали значительно более высокое электрическое сопротивление по сравнению с алюминием, зависящее от величины тока, протекающего по проводу. Поэтому передача больших мощностей на значительные расстояния затруднена вследствие больших потерь напряжения и электроэнергии. Кроме этого, вследствие различных параметров троса и фазных проводов и неучастия троса в общей транспозиции падения напряжений в фазах оказываются различными, что приводит к появлению несимметрии напряжений по обратной последовательности –  $k_2$ , увеличивающейся с увеличением передаваемой мощности и приводящей к ее снижению. Несимметрия напряжений вызывает появление токов обратной последовательности, создающих дополнительные потери мощности в линии.

При вычислениях для определения активных и реактивных сопротивлений грозозащитного троса использовались экспериментальные данные, взятые из [2, табл. П1.8]. Среднегеометрическое расстояние между проводами принято 4,5 м, напряжение прямой последовательности  $U = 1,05U_{ном}$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi = 0,9$ , протяженность линии 50 км. Сечения фазных проводов, используемые на ВЛ 110 кВ, и их пропускная способность приведены в таблице.

Сечения фазных проводов и их пропускная способность

Сечение (алюминий/ сталь), мм <sup>2</sup>	70/11	95/16	120/19	150/24	185/29
Допустимо длительная мощность, МВт	47,6	59,3	68,7	80,9	92,6

Вычисления, проведенные при замене тросом фазного провода линии для каждой марки провода, представлены в виде графиков, изображенных на рис. 3 - 5, показывающих зависимости коэффициента несимметрии напряжения  $k_2$ , потери мощности  $dP$  и напряжения прямой последовательности  $U$  от величины передаваемой мощности.

Так как величина несимметрии напряжений не должна превышать 2%, то для реализации предложенного решения необходимо симметрирование напряжения при увеличении передаваемой мощности свыше 8 МВт (исходя из анализа графиков), т.е. предусмотреть симметрирующие устройства и устройства компенсации реактивной мощности, вследствие большой посадки напряжения. К тому же необходимы устройства выбора и переключения фазы на грозотрос и изменения в конструкции ВЛ для увеличения изоляции троса.

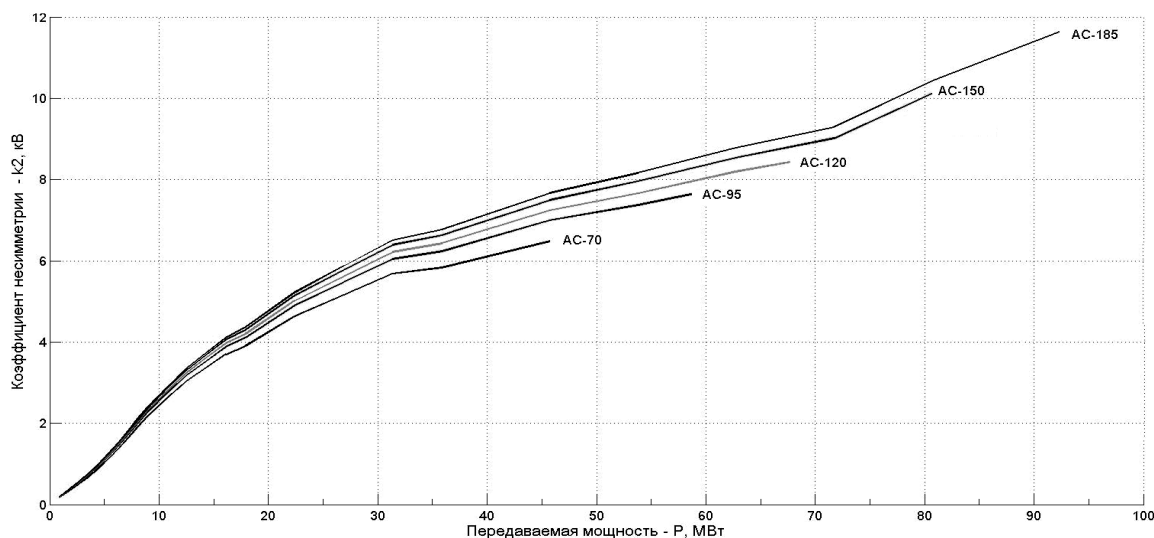


Рис. 3. Коэффициент несимметрии по обратной последовательности

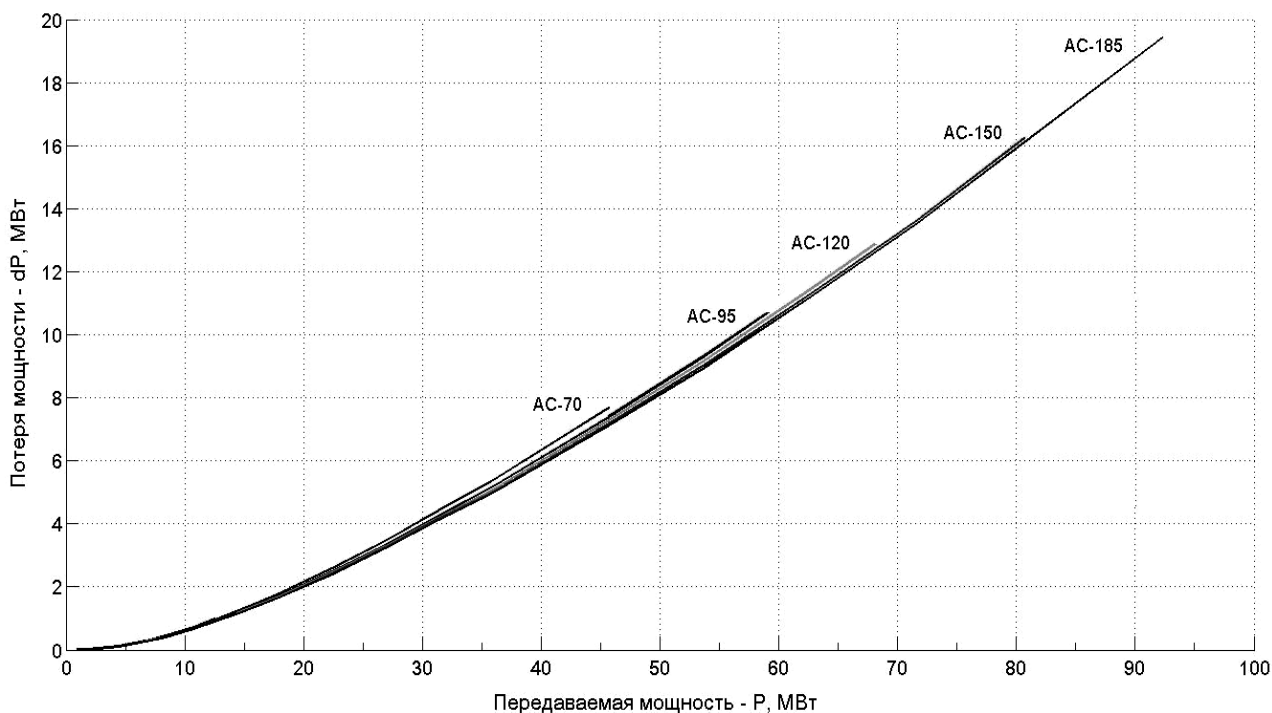


Рис. 4. Величина потери активной мощности

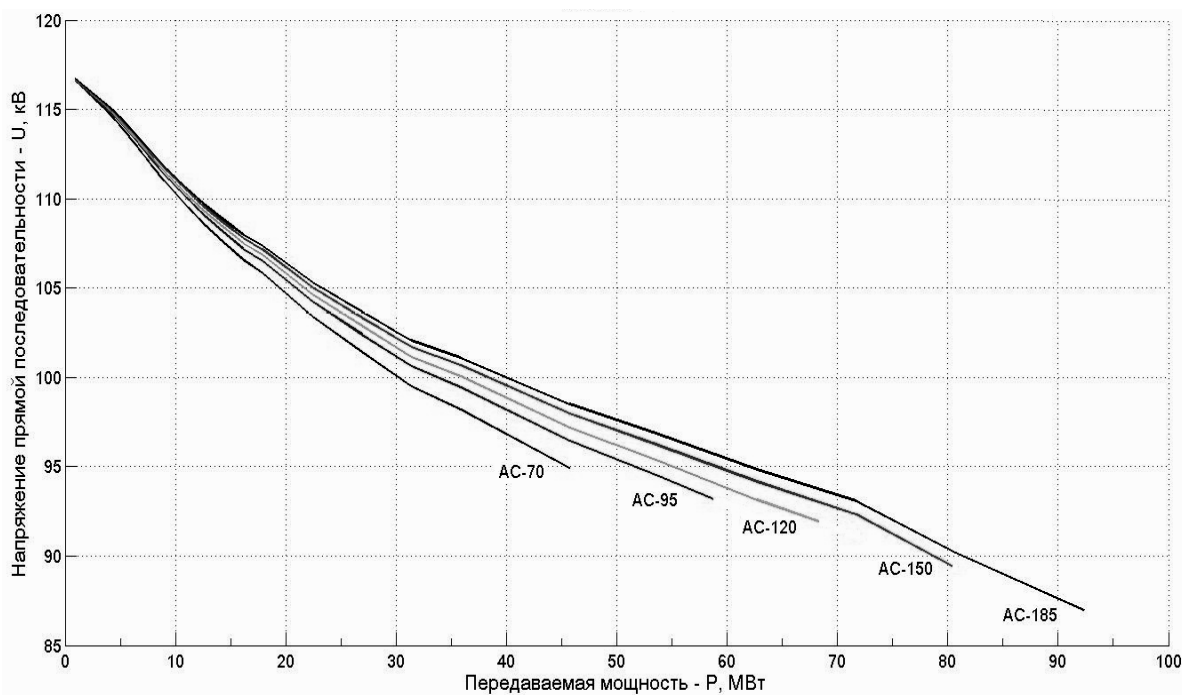


Рис. 5. Напряжение прямой последовательности

Соответственно потребуются финансовые затраты на реализацию этих мероприятий. При этом из-за недостаточной пропускной способности межсистемных и системообразующих электрических сетей в ряде регионов России данное предложение может обеспечить снижение ущерба от перерывов электроснабжения потребителей в сложившейся на сегодняшний день ситуации. Учитывая, что основной вид повреждения в электрических сетях – это однофаз-

ные повреждения (более 80%), возможно и проведение пофазного ремонта ВЛ, также сохраняя электроснабжение, а также при включении на параллельную работу грозотроса с фазным проводом, т. е. расщепление провода одной из фаз на две изолированные полуфазы, достигается возможность увеличения пропускной способности ВЛ.

Таким образом, сущность предлагаемого к рассмотрению подхода заключается в том, что с целью сохранения бесперебойности электроснабжения потребителя во время аварийно-опасных гололедно-ветровых нагрузок предлагается применение грозотроса в качестве резервной фазы, что позволит производить пофазную плавку, не отключая линию электропередачи, сохранив электроснабжение потребителя. Если использование грозотроса в качестве резервной фазы будет неэффективным, то возможно использование вместо него обычного фазного провода, одновременно выполняющего функции грозотроса.

Если производится строительство линии, то целесообразнее резервную фазу выполнить четвертым проводом или одну из фаз использовать как фазу со вдвоенным проводом, общее сечение которых приблизительно равно сечению одиночного провода, а если модернизация, то – использование грозотроса, как резервной фазы.

По оценкам среднесезонных потерь в сельском хозяйстве, а также в непрерывных производствах обрабатывающей промышленности, ущерб от недопоставки электроэнергии в 25-30 раз превышает стоимость недопоставленного количества энергии [3], а стоимость электроэнергии в европейской части России, исходя из единых тарифов по передаче электроэнергии, составляет в среднем 800 руб./МВт\*ч, то при отключении одной линии, при ее загруженности 30 МВт ущерб, по приблизительным подсчетам, может достигать до 600 тыс. руб. Учитывая, что за сезон приходится проводить десятки плавков, использование резервной фазы может быть вполне экономически оправданно.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каганов В.А. Как расплавить лед на проводах / В.А. Каганов // Наука и жизнь. 2008. №8. С.116-118.
2. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. Красноярск: Издательские проекты, 2006. 720 с.
3. Безруких П.П. Роль возобновляемой энергетики в энергосбережении в мире и в России / П.П. Безруких // Электрика. 2004. №4. С.3-5.

**Левин Дмитрий Сергеевич** –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

**Карнаух Алексей Владимирович** –

соискатель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

**Вырыханов Денис Александрович** –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

**Угаров Геннадий Григорьевич** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 08.11.10, принята к опубликованию 22.11.10*



Ю.М. Голембиовский, О.В. Тимофеева

## МНОГОМОДУЛЬНЫЕ ОДНОФАЗНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

*Рассмотрена организация оперативно перестраиваемых преобразовательных сетей. Приведены результаты исследования переходных процессов при включении/отключении модулей и при набросе/сбросе нагрузки.*

Преобразовательная сеть, однофазный инверторный модуль, переходные процессы

Y.M. Golembiovskiy, O.V. Timofeeva

## THE MULTIMODULE SINGLE-PHASE TRANSFORMING NETS

*The problem of organization of the efficiently convertible transforming net is described. Researches of transient processes when turning on/off the modules and load surge/reset was done.*

The transforming net, single-phase inverter module, transient processes

Концепция оперативно перестраиваемых преобразовательных сетей (ОППС) впервые сформулирована в [1, 2] применительно к трехфазным потребителям электроэнергии. Такие сети представляют группу из  $n$  универсальных преобразовательных модулей, питающихся от своих индивидуальных источников напряжения и работающих на общую нагрузку. Свойство универсальности означает, что каждый из модулей может работать в одном из режимов: 1) генерации активной мощности; 2) компенсации избыточной реактивной мощности коммутирующих конденсаторов, возникающих при сбросе нагрузки (если модули строятся на основе инверторов тока), либо режима проведения реактивных токов нагрузки (если модули строятся на основе инверторов напряжения); 3) режим резерва.

Такая многофункциональность модулей позволяет оперативно адаптировать структуру сети к изменяющимся параметрам нагрузки с целью минимизации потерь электроэнергии в ОППС и экономии ресурса работоспособности модулей. Кроме того, существенно сокращаются затраты на резервирование, если таковое требуется для повышения надежности системы электроснабжения.

Концепция перестраиваемых сетей развивалась применительно к 3-фазным системам. При этом существует большое количество однофазных потребителей, таких как индукционные печи, устройства для термообработки металлов, устройства питания электронной аппаратуры, сварочные агрегаты, источники бесперебойного питания, электродвигатели и многие другие. Для одних видов нагрузки, потребляющих энергию от источников постоянного напряжения, получаемого после выпрямления инверторного напряжения, чисто прямоугольная форма сигнала, генерируемого однофазным преобразовательным модулем, является наиболее удобной, т.к. пульсации напряжения на входе фильтра невелики, что существенно уменьшает массо-габаритные показатели фильтрующих элементов.

Для нагрузок другого типа (резистивные нагревательные и осветительные элементы, индукционные печи, реле, электромагниты) прямоугольная (без нулевой паузы) форма генерируемого напряжения является вполне допустимой, поскольку такого рода нагрузка либо совершенно безразлична к роду тока, либо сама обладает фильтрующими свойствами вследствие наличия индуктивной составляющей нагрузки.

Наконец существуют нагрузки, которые требуют чисто синусоидальной формы питающего напряжения (сельсины, поворотные трансформаторы и др.). Как указывается в [3], синусоидальная форма выходного напряжения наиболее универсальна, т.к. обеспечивает эффективную работу всех видов нагрузок переменного тока, а иногда становится целесообразной и для нагрузок постоянного тока, т.к. обеспечивает коммутацию силовых ключей и диодов при токе, близком к нулю, уменьшая высокочастотные пульсации, радиопомехи и, следовательно, массу и габаритные размеры фильтрующих узлов в инверторе, потребителе и линии связи. При синусоидальной форме напряжения передача энергии на значительные расстояния по обычным проводным линиям не вызывает искажения формы напряжения.

Изложенные соображения позволяют выделить два класса однофазных ОППС: 1) формирующие на нагрузке чисто прямоугольное напряжение. Назовем такие сети сетями первого типа (ОППС1); 2) генерирующие напряжение многоуровневой (многоступенчатой) аппроксимирующей синусоиду формы с коэффициентом гармоник, зависящим от количества уровней, их амплитуд и длительности. Будем называть такие сети сетям второго типа (ОППС2).

На рис. 1 представлена обобщенная структура ОППС. Каждый модуль включает управляемый выпрямитель УВ со своим блоком управления БУВ, фильтр и однофазный инверторный мост с блоком управления БУИ. Модули работают параллельно и синфазно. Синхронизация обеспечивается тактированием от общего тактового генератора ТГ. Систему управления целесообразно строить как двухуровневую. Оставляя в стороне вопросы практической реализации системы управления, сформулируем основные задачи, которые она должна решать.

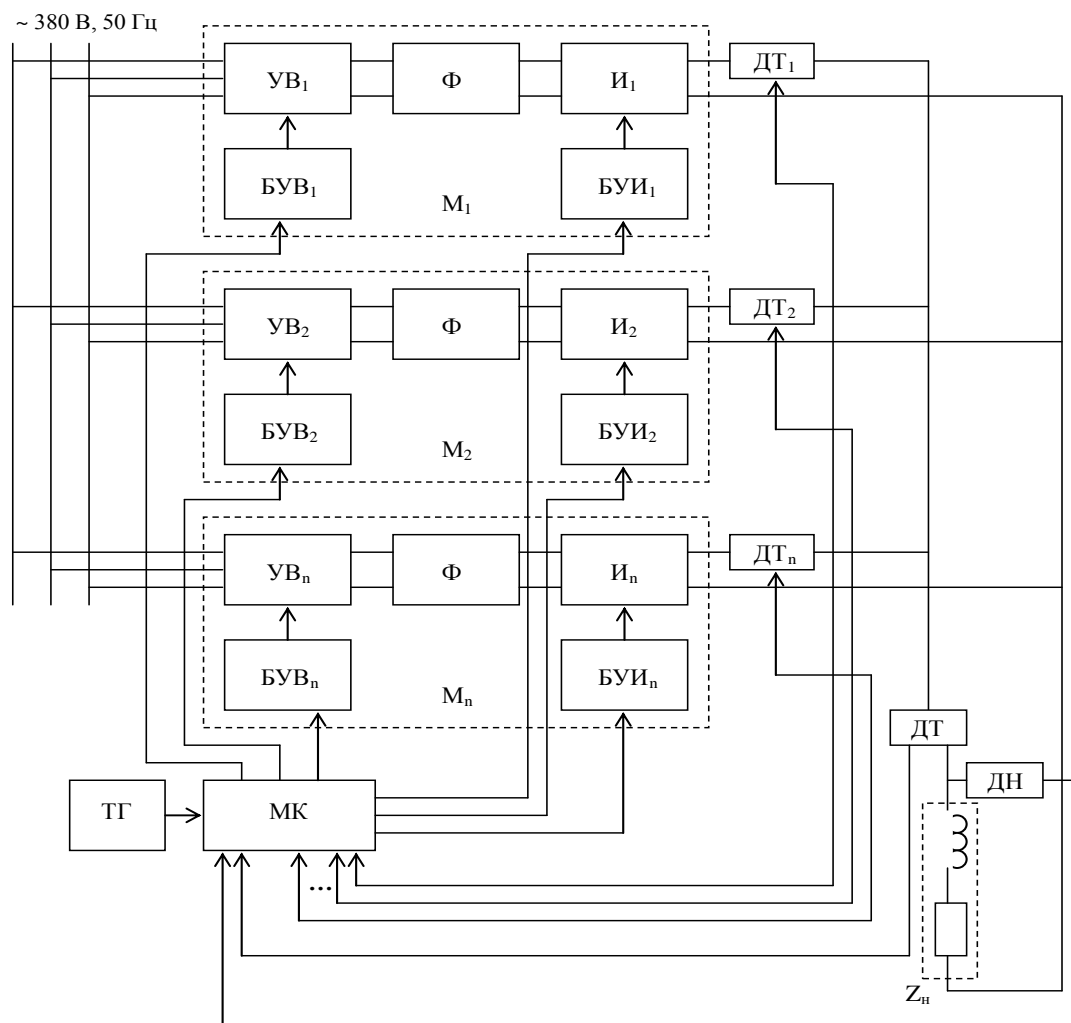


Рис. 1. Структура ОППС

Управление рассматриваемой сетью не требует изменения функций модулей, поэтому задача оперативного управления сводится к включению либо отключению отдельных модулей в зависимости от величины и характера нагрузки. Для этой цели микроконтроллер верхнего уровня (МК) опрашивает датчики тока (ДТ) и напряжения (ДН) нагрузки и, располагая информацией о номинальных мощностях модулей, рассчитывает требуемый состав инверторов и выдает блокам управления выпрямителям (БУВ) и инверторам (БУИ) приказ на включение либо отключение выбранного для этой цели модуля.

Другой задачей системы управления является обеспечение равномерной загрузки модулей, пропорциональной их номинальным значениям. С этой целью МК верхнего уровня отслеживает значения токов инверторов и выдает значения уставок блокам управления выпрямителями для корректировки их углов управления.

На рис. 2 представлен фрагмент ОППС1, включающий 3 инвертора, работающих на общую нагрузку. Важным аспектом исследования является установление характера переходных процессов, возникающих при включении/выключении модулей и при набросе/сбросе нагрузки.

На рис. 4 приведены осциллограммы токов инверторов и напряжения на нагрузке при мгновенном включении и отключении одного из модулей, полученные с использованием системы моделирования PSIM Demo. Кривые показывают, что никаких неблагоприятных переходных процессов не возникает. Токи перераспределяются между всеми работающими модулями, а напряжение на нагрузке остается неизменным.

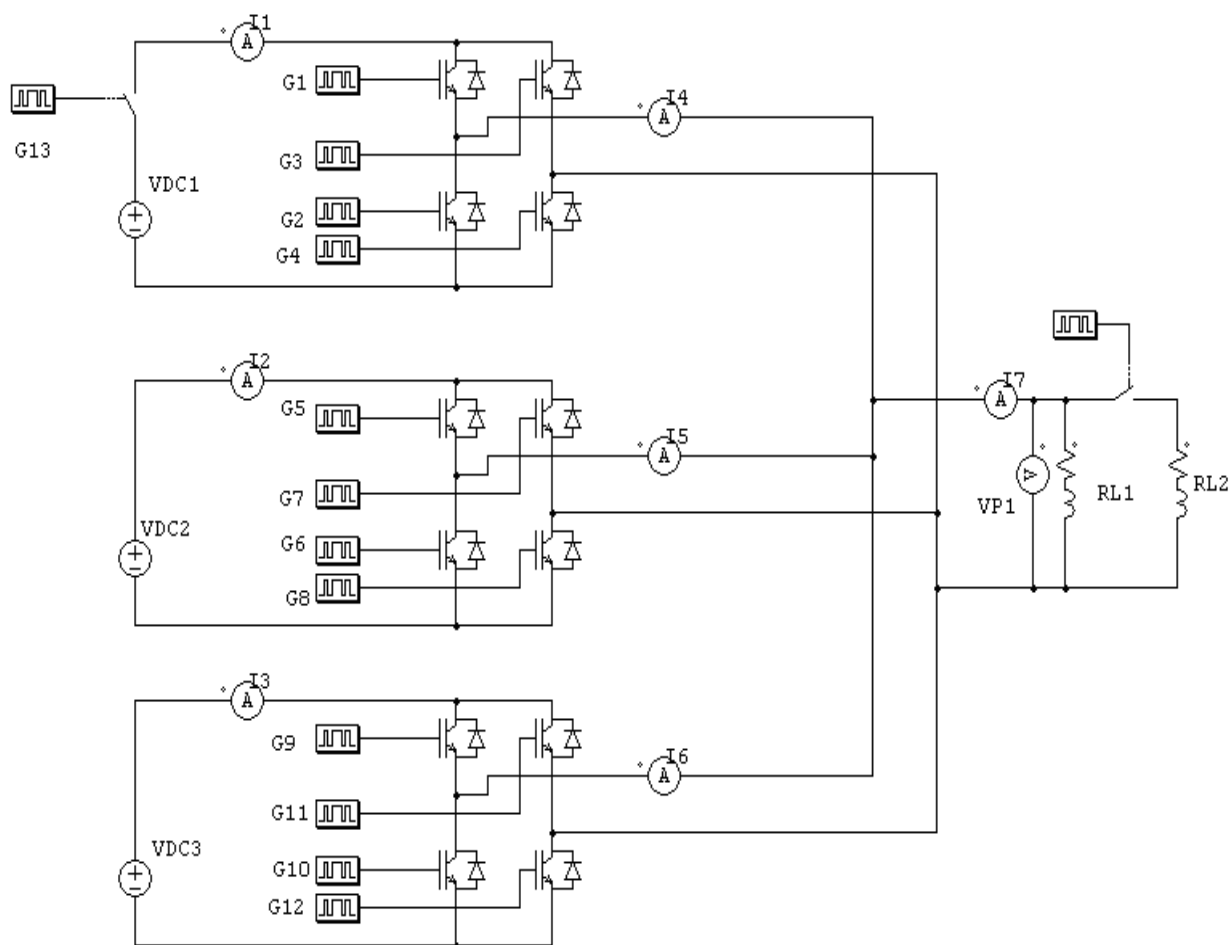


Рис. 2. Фрагмент ОППС1

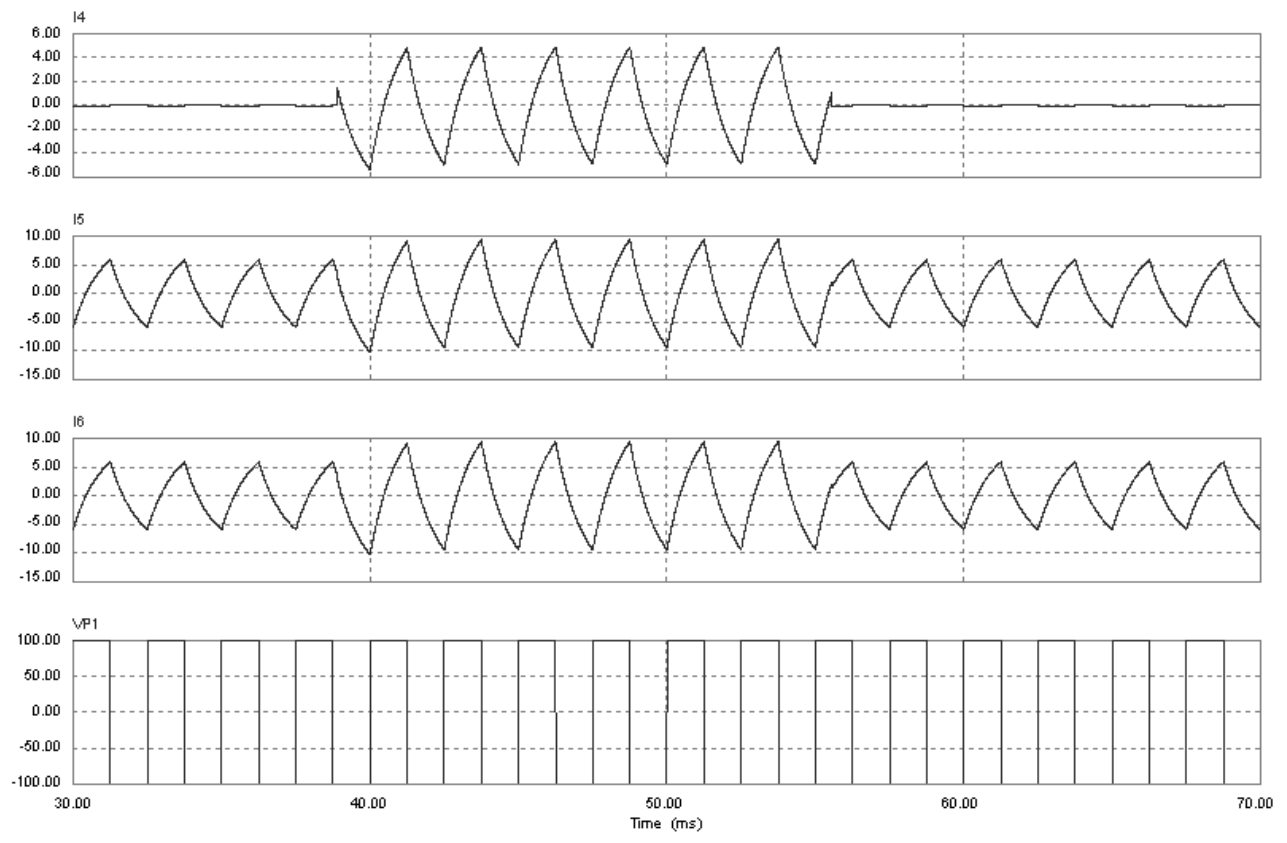


Рис. 3. Процессы включения и отключения модуля

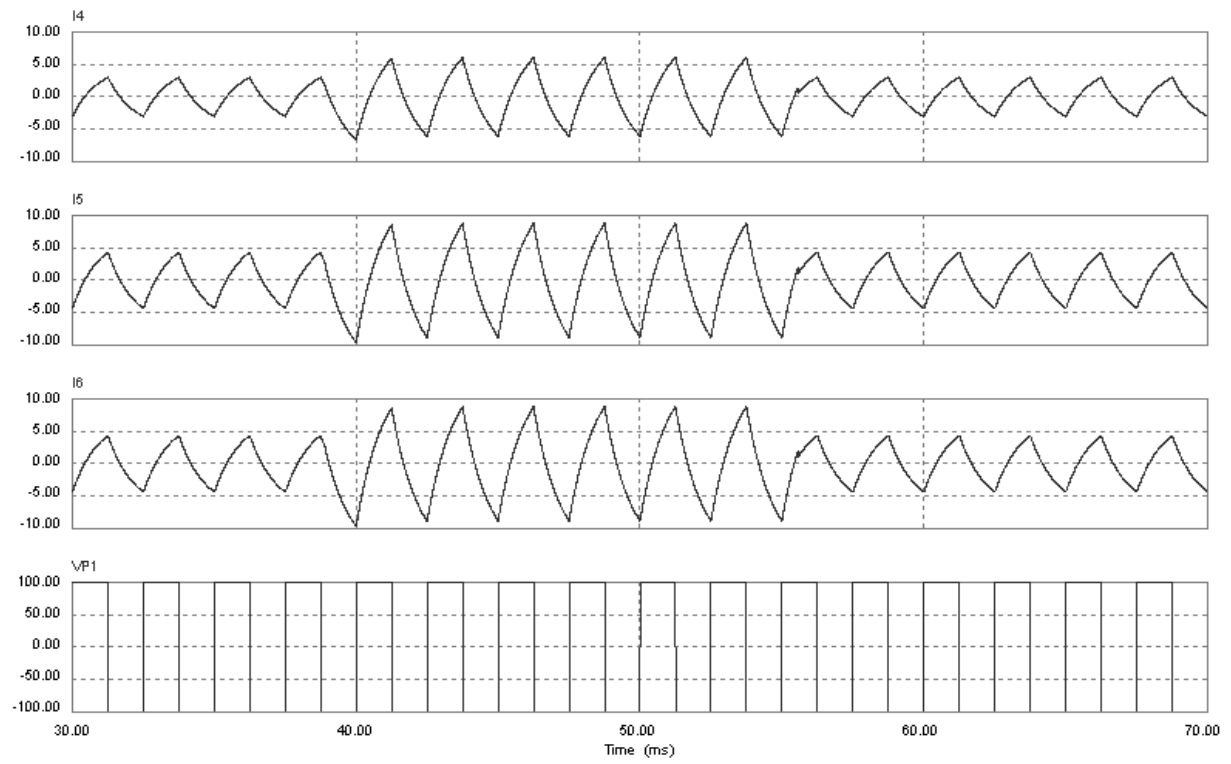


Рис. 4. Процессы отключения и подключения двойной нагрузки

Процесс сброса и наброса двойной нагрузки иллюстрирует рис. 4, из которого также следует, что никаких неблагоприятных процессов, которые приводили бы к искажению формы напряжения на нагрузке или к непропорциональному перераспределению токов между модулями, не происходит.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голембиовский Ю.М. Алгоритм оперативной оптимизации структуры перестраиваемого тиристорного комплекса / Ю.М. Голембиовский, С.Б. Пятибратов // Системы управления производственными процессами: межвуз. сб. науч. тр. / НПИ. Новочеркасск, 1989. С.44–49.
2. Кантер И.И. Система централизованного электроснабжения на базе параллельно работающих преобразователей частоты / И.И. Кантер, Ю.Б. Томашевский, Ю.М. Голембиовский // Электричество. 1991. №1. С. 39–47.
3. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи / В.С. Моин. М.: Энергоатомиздат, 1986. 347 с.

**Голембиовский Юрий Мичиславович** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета

**Тимофеева Олеся Владимировна** –

ассистент кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 08.11.10, принята к опубликованию 22.11.10*

УДК 62.50:621.789.32

**М.В. Мусатов, А.С. Моисеев, А.А. Львов**

#### **ПРИМЕНЕНИЕ ОБЩЕГО МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ АЦП**

*Анализируется применение полного метода наименьших квадратов для улучшения качества оценивания параметров АЦП.*

Метод наименьших квадратов, аналогово-цифровой преобразователь, эффективное число бит

**M.V. Musatov, A.S. Moiseev, A.A. L'vov**

#### **USING GENERALISED LEAST SQUARES METHOD FOR ADC TESTING**

*Analysis applied generalized LSM for improvement ADC testing quality.*

Least squares method, analog-to-digital converter, effective number of bites

Современная электроника активно развивается в направлении цифровых систем, которые применяются во многих областях жизни и деятельности человека. Существенная часть сигналов, на которые необходимо реагировать цифровой системе, являются аналоговыми по своей природе. Для преобразования аналоговых сигналов в цифровые используются аналого-цифровые преобразователи (АЦП) с различными характеристиками в зависимости от области применения. В связи с этим становится актуальной задача комплексной оценки параметров АЦП с целью выделения преобразователей с требуемыми характеристиками. Существует методика испытаний АЦП на основе метода наименьших квадратов (МНК), подробно описанная в международном стандарте IEEE 1241-2000 [3]. В результате испытаний оцениваются следующие параметры: среднеквадратичное отклонение синусоидальной волны, восстановленной от исходного синусоидального сигнала по результатам с выхода АЦП; эффективное число бит (ЕНОБ). Данные параметры являются одними из основных при оценке качества АЦП, однако их значения могут быть неточны из-за погрешностей измерений, связанных с параметрами эталонного сигнала и тактового генератора, задающего частоту дискретизации.

Предлагаемая методика на основе общего МНК позволяет существенно увеличить качество оценки параметров АЦП за счет учета погрешностей тактовых сигналов (погрешностей во времени) [4]. Так же актуальна модель испытаний АЦП, позволяющая проводить анализ различных методик испытаний при моделировании различных погрешностей, без необходимости использования комплекса аппаратного оборудования, обычно используемого при реальных испытаниях.

Общий метод наименьших квадратов (ОМНК) предложен Голубом (Golub) и Ван Лоаном (Van Loan), как метод решения переопределенных систем уравнений вида  $AX \approx B$ , где  $A \in R^{m \times n}$  и  $B \in R^{m \times d}$  известные данные, а  $X \in R^{n \times d}$  неизвестные [1]. ОМНК представляет собой обобщение метода аппроксимации с использованием классического МНК, в случае, когда матрицы  $A$  и  $B$  известны с ошибками.

Определение ОМНК связано с асимметрией классического МНК, т.е. предположения, что  $B$  известна точно, а  $A$  содержит ошибки, поэтому он основан на минимизации (в смысле нормы Фробениуса) корректирующих составляющих  $\Delta A$  и  $\Delta B$  известных данных  $A$  и  $B$ , формирующих следующую систему уравнений.

$$\begin{aligned} \hat{A}X &= \hat{B}, \\ \hat{A} &= A + \Delta A, \text{ следовательно: } (A + \Delta A)X = B + \Delta B, \\ \hat{B} &= B + \Delta B. \end{aligned} \quad (1)$$

Задача оптимизации для системы (1) следующая:

$$\min \|\Delta A, \Delta B\|_F, \quad (A + \Delta A)X = B + \Delta B. \quad (2)$$

Для решения задачи оптимизации (2), определим функцию Лагранжа  $L$

$$L = \|\Delta A, \Delta B\|_F^2 + \lambda_1^T (Ax + \Delta Ax - B - \Delta B). \quad (3)$$

Геометрическая интерпретация ОМНК в линейном случае может быть представлена как минимизация суммы квадратов расстояний до прямой  $l$  [2]

$$f(l) = \sum_{i=1}^m \text{dist}((x_i, y_i), l)^2. \quad (4)$$

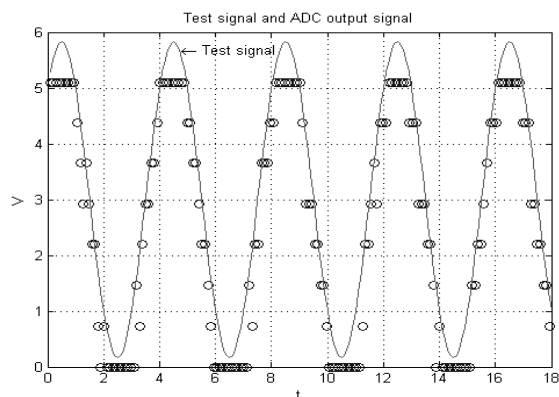


Рис. 1. Непрерывной линией обозначен эталонный тестовый сигнал, подаваемый на вход АЦП, знаком «о» – дискретные отсчеты, получаемые на выходе АЦП

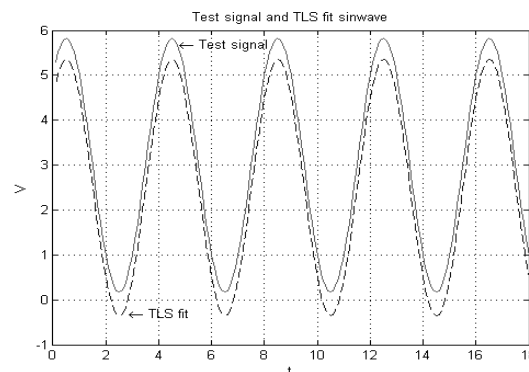


Рис. 2. Непрерывная линия – эталонный тестовый сигнал, подаваемый на вход АЦП, пунктирная линия – синусоидальная волна, полученная в результате анализа выходного сигнала АЦП с использованием общего МНК (TLS)

Для проверки работоспособности предложенной методики оценивания параметров АЦП с использованием общего МНК, а также проверки качества моделирования условий испытания АЦП проведена серия экспериментов. Для проведения испытаний использовалась программа, реализованная на встроенном языке системы Matlab.

Модель синусоидального сигнала задается в следующем виде:  $y = A + B \sin(\omega t) + C \cos(\omega t)$ . Параметры синусоидального сигнала были инициализированы следующими значениями:  $A = 3, B = 2, C = 2, \omega = \pi/2$ . Для испытания использована модель трехрядного АЦП с частотой дискретизации  $\omega_{discr} = 3\pi$ .

Ниже приведены характеристики восстановленных сигналов и среднеквадратичные отклонения от исходного сигнала. 1)  $y_{test} = 3 + 2 \sin(\pi/2) + 2 \cos(\pi/2)$  – эталонный тестовый сигнал; 2)  $y_{tls} = 2.4959 + 2.0182 \sin(\pi/2) + 1.9987 \cos(\pi/2)$  – сигнал, восстановленный с использованием общего МНК; 3)  $y_{ols} = 2.4791 + 2.0465 \sin(\pi/2) + 1.9666 \cos(\pi/2)$  – сигнал, восстановленный с использованием классического МНК.

Анализируя представленные характеристики, можно видеть, что применение общего МНК целесообразно с точки зрения улучшения качества оценивания параметров АЦП, таких как среднеквадратическая ошибка и другие параметры, рассчитанные с её использованием.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Marquardt D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters / D. Marquardt // SIAM J. Appl. Math., 1963, Vol. 11, pp. 431–441.
2. Nocedal J. Numerical Optimization / J. Nocedal, S.J. Wright. Springer, New York, 1999.
3. IEEE Standard 1241-2000 IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters.
4. Blair J. Corrected RMS error and effective number of bits for sinewave ADC tests / J. Blair, T. Linnenbrink // Computer Standards and Interfaces. Jan. 2004. Vol. 26, No. 1, pp. 43–49.

**Львов Алексей Арленович** –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Мусатов Михаил Викторович** –

аспирант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Моисеев Антон Сергеевич** –

магистрант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 08.11.10, принята к опубликованию 22.11.10*



---

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ**

---

УДК 658.562.3

**М.Б. Бровкова, С.В. Свиридов, Н.С. Сидоров**

### **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КРИТЕРИАЛЬНЫХ ОЦЕНОК СОСТОЯНИЯ СЛОЖНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

*Предлагается система критериальных оценок состояния машин с учетом нестационарных связей. Рассмотрены критерии как во временной, так и в частотной областях.*

Критерий, оценка состояния, сложное технологическое оборудование, нестационарные связи

**M.B. Brovkova, S.V. Sviridov, N.S. Sidorov**

### **THE SYSTEM OF CRITERION EVALUATION OF COMPLEX ENGINEERING EQUIPMENT PERFORMANCE**

*The article describes the system of criterion evaluation of machine performance with regard to rheonomic constraints. It examines the criteria in time and frequency domains.*

Criterion, condition estimation, the difficult process equipment, non-stationary communications

Разработана система критериальных оценок состояния машин с учетом нестационарных и нелинейных связей функциональных элементов технологического оборудования и технических возможностей получения первичной информации в производственных условиях. Нами предложены критерии как во временной, так и в частотной областях пространства состояний динамических процессов рассматриваемых объектов. В качестве первичных источников информации проанализированы возможности использования термоЭДС, возникающий при контакте естественной термодпары «инструмент-заготовка», тензометрия, на основе которой можно выделить информацию о силе резания, акустическую эмиссию при резании и виброакустические колебания в зоне механообработки. Как показали исследования, виброакустические колебания, возникающие при функционировании технологических машин, которые наиболее полно отражают динамику механических систем при наличии возмущений и более доступны для измерения.

Проведенные нами многочисленные экспериментальные исследования технологического оборудования показали, что на определенных сочетаниях технологических параметров существуют однородные реализации колебаний упругих подсистем, которые соответствуют

наилучшим показателям качества изготовленной детали. При других сочетаниях параметров возникают неоднородности колебательных процессов по амплитуде в различных областях наблюдаемого частотного диапазона. Это приводит к увеличению работы системы управления. Таким образом, это явление может служить основой для формирования критерия оптимизации параметров технологических режимов. При этом в теории автоматического управления (ТАУ) существует предложенный А.А. Красовским математический аналог этого критерия, имеющий вид функционала:

$$I = V[x_1(t_2), \dots, x_n(t_2), t_2] + \int_{t_1}^{t_2} Q[x_1, \dots, x_n, t] dt + \frac{1}{q} \sum_{j=1}^m \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{u_j}{k_j} \right)^q dt + \frac{1}{p} \sum_{j=1}^m \int_{t_1}^{t_2} \left( k_j \sum_{k=1}^n b_{kj} \frac{\partial V}{\partial x_k} \right)^p dt, \quad (1)$$

третий и четвертый члены которого в нашем случае характеризуют, соответственно, работу управлений, в том числе связанных с оптимизацией и устранением последствий отказов, и работу сигналов управления приводами в процессе формообразования, а первый и второй – с учетом результатов анализа структурной устойчивости являются оценкой точности приведения станка в устойчивое состояние по результатам управления. При этом, чем меньше значения оценки, тем выше точность, следовательно, устойчивее состояние, т.е.

$$I \rightarrow \min. \quad (2)$$

Для вычисления оценки предложен подход, основанный на представлении информации о колебаниях, зарегистрированных в течение времени  $t_p$ , смешанной дискретной моделью авторегрессии со скользящим средним и последующим вычислением по ней интеграла функции Грина

$$J = \int_0^{t_p} |G(t)| dt, \quad (3)$$

который является ее статистическим аналогом.

Интеграл (3) вычисляется в реальном времени; условие (2) может быть принято в качестве стратегии поиска оптимального сочетания параметров технологического режима, реализуемой в соответствии с принципом обратной связи.

Представленные критерии во временной области интегративно учитывают состояние оборудования при экспресс-анализе нестационарных и нелинейных систем. Для более подробного исследования динамических процессов дополнительно необходимо применение критериев состояния технологического оборудования в частотной области.

В качестве объектов исследования приняты динамические системы токарных и шлифовальных станков. Исследована нелинейная модель динамической системы токарного станка [1]. Проведены классификация нелинейных элементов и их группировка, показавшие, что в большинстве случаев они представляют результат наличия различных кинематических погрешностей в станке или процессов трения в его узлах и механизмах. Нелинейные элементы в основном имеют характеристику типа «зазор» или «сухое» трение. Идентификация линейных элементов при моделировании позволила представить их колебательными звеньями второго порядка, которые формируют вместе с нелинейными элементами регистрируемый при экспериментах стохастический многочастотный спектр колебаний на выходе динамической системы.

Для реализации процедуры моделирования процессов, протекающих в динамической системе, ранее выполнены исследования типового соединения: линейный элемент – нелинейный элемент на основе имитационного моделирования [1]. Результаты исследования позволили установить, что при прохождении сигнала через типовое соединение возникает эффект «перетекания» его спектра из области низких в область высоких частот, причем его степень в значительной мере определяется параметрами нелинейных элементов. Это позволило ввести в рассмотрение показатель эффективности стабилизации преобразующих свойств (коэффициент преобразования спектра  $St$ ), представляющий отношение амплитуд колебаний динамической системы на резонансных частотах ( $Amp_i$ ) к суммарной амплитуде ее колебаний на остальных частотах спектра выходного сигнала ( $Amp_j$ ):

$$St = Amp_1 / \sum_{i=2}^k Amp_i. \quad (4)$$

При этом, как показали результаты исследований, преобразующие свойства в направлении диссипации энергии колебаний тем выше, чем меньше значение показателя, т.е. чем более явно проявляется эффект перетекания энергии колебаний в область высоких частот анализируемого спектра. Это означает, что по результатам вычисления этого коэффициента можно реализовать следующую стратегию обеспечения стабилизации состояния динамической системы

$$St \rightarrow \min. \quad (5)$$

Процедура моделирования процессов в динамической системе осуществлена в три этапа. На первом этапе получена передаточная функция динамической системы, разомкнутой в месте наиболее эффективного с практической точки зрения съема информации о ее преобразующих свойствах. На втором этапе выполнено тестирование модели в линейном приближении, соответствующем традиционным представлениям динамики станков при различных значениях параметров линейных элементов. Результаты тестирования не отличаются от полученных ранее различными научными коллективами и авторами. Это позволило сделать вывод о корректности исходных допущений и ограничений, принятых при создании модели, и перейти к третьему этапу, связанному с нелинейным моделированием динамики процесса точения, а также наиболее часто сопровождающих его процессов: вынужденных колебаний, наростообразования, износа режущего инструмента.

Нами также предлагаются ряд критериев, выработанных на основе предварительных теоретических и экспериментальных исследований их реализуемости [1].

Отметим, что обзор исследований по динамике обработки позволил вскрыть широкий спектр подхода к оценке колебательных процессов в станках – от крайне вредных проявлений до полезного использования этого явления вплоть до искусственного внесения дополнительных вибраций в зону обработки. Наибольший интерес представляет позиция исследователей, которая базируется на принципе «оптимальности» колебательного процесса.

На основе анализа работ, выполненных в направлении поиска связи между качественными показателями обрабатываемых поверхностей и сопровождающими колебаниями, можно получить общее представление об «оптимальности» колебательного процесса. Критерием оптимальности является какой-либо технологический параметр обработки (стабильность процесса обработки, качество поверхности, скорость съема и т.д.). Свойство «оптимальности» связывается с уровнем колебаний, либо с их частотным составом, либо базируется на двух показателях:

1) уровень колебаний: при механической обработке из-за изменения ее условий можно определить оптимальный уровень колебаний (размах, действующее значение), который соответствует достижению наилучших показателей обработки;

2) частотный состав колебательного процесса: наилучшие показатели обработки достигаются в условиях колебаний, имеющих широкополосный равномерно распределенный спектр (в котором отсутствуют резко выраженные частотные составляющие и формы колебаний).

Отметим, что понятие оптимального уровня колебаний не имеет четких границ, и он может быть определен лишь для конкретных условий обработки и сочетаний технологических режимов и состояний динамической системы.

Вместе с тем свойство равномерности спектра является более общим понятием и может быть оценено, например, коэффициентом преобразования спектра (см. выше) или коэффициентом пикообразности спектра (см. далее).

Поскольку колебательный процесс имеет важное значение как первичный источник информации, для его анализа разработана специальная система идентификационных показателей.

Изложим кратко ее сущность.

В качестве носителя информации о колебательном процессе используется его спектральная поверхность, представляющая совокупность амплитудно-частотных спектров, свя-

занных между собой параметром времени обработки. Указанная спектральная поверхность описывается математически в виде двух систем сечений: спектральных и полосных. Произвольная пара смежных спектральных сечений сдвинута между собой на интервал времени, поэтому каждое полосное сечение представляет собой функцию изменения амплитуды спектра на данной частоте в течение времени обработки. Выполнив спектральное разложение системы полосных сечений, получаем дополнительную спектральную поверхность, которая содержит информацию о тренде амплитудно-частотного состава колебательного процесса в течение времени обработки.

Применив к системам сечений основной и дополнительной спектральных поверхностей методы анализа случайных процессов, можно получить систему идентификационных показателей колебательного процесса.

Отметим, что изложенный способ идентификации колебательного процесса позволяет на основе методов статистической обработки и корреляционного анализа, примененных к системам полосных и спектральных сечений основной и дополнительной спектральных поверхностей, получить показатели, отражающие свойства колебательного процесса. В основе способа идентификации содержится исследование форм продольных и поперечных сечений поверхностей, законов изменения ординат сечений и корреляционных связей между ними. Ниже приводятся основные показатели, с помощью которых можно получить представление об особенностях колебательных процессов и увязать их с динамическими параметрами станочной механической системы.

Показатель пикообразности спектральных сечений  $K_{\text{псо}}$  основной спектральной поверхности отражает форму спектров колебательного процесса. Максимальное значение указанный показатель имеет для колебательного процесса с одним резко выраженным пиком спектра, в котором доминирует одна частотная составляющая. Вместе с тем с увеличением числа пиков спектра и с уменьшением их амплитуд значение указанного показателя обладает тенденцией к снижению и приближается к нулю для спектрального сечения, форма которого близка к прямоугольной. Минимальное значение для основной спектральной поверхности показатель пикообразности имеет для случайного процесса, а максимальное значение принимает для колебательного процесса, сопровождающего выхаживание шлифованной поверхности. Отметим, что оптимальный колебательный процесс с позиций требований равномерности его спектра характеризуется минимальным значением показателя пикообразности.

Показатель динамичности системы полосных сечений  $K_{\text{дпо}}$  основной спектральной поверхности отражает степень изменяемости частотных составляющих спектра колебательного процесса за период времени обработки. В основе его вычисления содержатся дисперсионные характеристики полосных сечений и скорости изменения ординат. Низкие значения данного показателя свидетельствуют о том, что колебательный процесс близок к стационарному процессу, который характеризуется стабильными во времени амплитудно-частотными характеристиками. Кроме того, стационарный колебательный процесс с устойчивыми параметрами является отражением устойчивых движений динамической системы. Отметим также, что если устойчивые частотные составляющие не связаны с вынужденными формами колебаниями, то они являются проявлением неустойчивости динамической системы. В виде устойчивых движений на одной или нескольких частотах проявляется неустойчивость динамической системы. Высокие значения предлагаемого показателя системы полосных сечений означают, что амплитуды частот спектра колебательного процесса претерпевают существенные изменения в течение времени обработки, не являются стабильными. Признак неустойчивости амплитуд частотных полос основной поверхности свидетельствует об общей устойчивости станочной динамической системы или, по крайней мере, о том, что система не переходит в режим устойчивых автоколебательных движений. Отметим, что с указанным показателем связано свойство стабильности частотных полос спектра. Чем больше значение показателя, тем меньше стабильных частотных составляющих в колебательном процессе и наобо-

рот. Наибольшее значение показатель принимает для случайного процесса. Для остальных процессов значение указанного коэффициента изменяется незначительно. Основные спектральные поверхности процессов обработки имеют достаточно стабильные частотные полосы в течение всего времени обработки. Вместе с тем основная спектральная поверхность случайного процесса не содержит таких выраженных частотных полос. Таким образом, с помощью показателя оценивается стабильность частотных полос спектра. Поскольку стабильность частотных полос можно рассматривать как признак устойчивости колебательных движений, то целесообразно сделать следующий вывод. Оптимальный колебательный процесс, отвечающий устойчивому состоянию динамической системы, должен характеризоваться достаточно высоким средним значением показателя динамичности системы полосных сечений основной спектральной поверхности.

Показатель корреляции полосных сечений  $K_{\text{кпо}}$  основной спектральной поверхности отражает синхронность изменения ординат частотных полос спектра. Указанная синхронность может иметься в случае, если в динамической системе действует достаточно сильный источник возмущений с откликом на основных частотах спектра. Тогда значения ординат частотных полос оказываются функционально связанными с ритмом возбудителя колебаний, что проявляется в коррелированности форм частотных полос. Указанный показатель определяется как среднее значение из положительных коэффициентов корреляции, рассчитанных между парами наиболее значимых частотных полос спектра, например, для частотных полос с ординатами, среднее значение которых выше среднего значения ординат всей поверхности. Отметим, что образу оптимального колебательного процесса соответствует минимальное значение показателя корреляции полосных сечений основной спектральной поверхности.

Показатель пикообразности системы полосных сечений  $K_{\text{пнд}}$  дополнительной спектральной поверхности отражает уровень пикообразности спектров, полученных разложением ординат частотных полос основной спектральной поверхности в ряд Фурье. Высокая пикообразность дополнительных спектров означает, что в изменении ординат полосных сечений основной спектральной поверхности доминирует определенный возбуждающий фактор. С другой стороны, широкополосный многочастотный спектр без ярко выраженных составляющих, о чем свидетельствует низкое значение, является наиболее благоприятным для колебательного процесса в зоне обработки.

Показатель нестационарности  $K_{\text{нст}}$  колебательного процесса отражает соотношение в нем переменных и постоянных составляющих и вычисляется в виде отношения среднего значения ординат дополнительной поверхности к среднему значению ординат основной поверхности. При высоком числе частотных полос спектра представляется целесообразным усечь основную спектральную поверхность по оси частот до нескольких десятков наиболее значимых частотных составляющих спектра, что повышает информативность показателей колебательного процесса. Отметим, что для стационарного процесса значение указанного показателя обращается в ноль, поскольку ординаты дополнительной спектральной поверхности как результат разложения полосных сечений основной поверхности в ряд Фурье имеют нулевые значения. С другой стороны, появление в колебательном процессе свойства нестационарности, что соответствует неустойчивому колебательному процессу (или устойчивому состоянию динамической системы) соответствует увеличению значения показателя процесса.

Таким образом, выполненный анализ свойств колебательного процесса, оцениваемый системой идентификационных показателей, позволяет описать следующие требования к оптимальному колебательному процессу при обработке:

1) отсутствие резко выраженных частотных составляющих (пиков) спектра, т.е. минимальное значение показателя пикообразности  $K_{\text{псо}}$  спектральных сечений основной спектральной поверхности;

2) при наличии пиков в спектре колебательного процесса амплитуды содержащих их частотных полос нестабильны в течение периода обработки (высокое значение показателя динамичности  $K_{\text{дно}}$  полосных сечений основной спектральной поверхности);

3) слабая положительная корреляция между функциями ординат полосных сечений, указывающая на низкую чувствительность динамической системы к возмущениям со стороны рабочих процессов, т.е. минимальное значение показателя корреляции  $K_{кпо}$  между функциями ординат полосных сечений основной спектральной поверхности;

4) нестационарный характер колебательного процесса как проявление стабильности процесса обработки, т.е. высокие значения показателя  $K_{нст}$  нестационарности колебательного процесса. Отметим, что на базе описанных идентификационных показателей колебательного процесса представляется возможным сформировать общий (комплексный) показатель колебательных свойств  $K_{кс}$  динамической системы в виде

$$K_{кс} = K_{псo} \cdot K_{кпо} \cdot K_{пшd} / (K_{нст} \cdot K_{дпо}). \quad (6)$$

Отсюда следует, что в соответствии с описанными выше требованиями к колебательному процессу и, опираясь на результаты выполненных исследований, можно установить, что критерию качества процессов обработки соответствует колебательный процесс, обладающий минимальным значением показателя колебательных свойств  $K_{кс}$ .

Пример реализации способа идентификации для различных процессов показал, что система идентификационных показателей может быть выбрана в качестве основы для оценки свойств колебательного процесса. Если в качестве критерия оптимальности колебательного процесса выбрать равномерность его частотного спектра на протяжении периода обработки, то ориентиром может служить случайный процесс, т.е. типа «белый шум».

Если свойство оптимальности колебательного процесса связывается с действием каких-либо благоприятных динамических факторов, например, с наличием колебаний в определенном частотном диапазоне, то для использования системы показателей целесообразно разбить исследуемый диапазон на две (или более) частотные области и к каждой области применить свои критерии оптимальности.

Приведенные выше результаты позволили сформировать иерархическую стратегию оценки состояния технологического оборудования, при которой интегративные оценки используются на верхнем уровне иерархии, а частотные методы открывают возможность диагностирования и локализации отказов различных функциональных блоков машин.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МД-7455.2010.8.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Динамический мониторинг технологического оборудования / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, И.Н. Янкин и др. Саратов: изд-во СГТУ, 2008. 312 с.
2. Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое описание / А.А. Красовский. М.: Наука, 1973. 464 с.

### **Бровкова Марина Борисовна –**

доктор технических наук, профессор кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

### **Свиридов Сергей Викторович –**

аспирант кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

### **Сидоров Николай Сергеевич –**

аспирант кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 658.012.011.56:658.512

А.А. Семагин, Г.М. Чуркин

## ВЫБОР МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

*Рассматривается задача выбора элементов структуры системы управления при их многофункциональности и наличии ограничений в форме неравенства. Общая задача выбора элементов подразделяется на выбор элементов по каждой группе реализуемых функций. Результат решения общей задачи определяется выбором решения, которое удовлетворяет ограничениям.*

Структура системы управления, задачи выбора

A.A. Semagin, G.M. Churkin

## CHOICE OF MULTIPURPOSE ELEMENTS OF STRUCTURE OF A CONTROL SYSTEM

*The problem of the choice of structural control system's elements with their multifunctionality having inequality limits. The general problem of element choice is subdivided into the element choice in each group of realizing functions. The result of the general problem solve is determined by the choice of solving satisfying the limits.*

The structure of control system, the problem of choice

Рассмотрим модель базовой структуры системы  $S$  в форме графа

$$G=(X, \Gamma_x), \text{ где } X=\{x_i\}, i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где  $X$  – множество вершин, соответствующих элементам структуры системы;  $\Gamma_x$  – отображение множества  $X$  в  $X$ ;  $N$  – число вершин графа  $G$ . Каждый элемент взвешенного графа  $G$  (вершины и рёбра) может быть исполнен конечным числом вариантов технической реализации, при этом каждая реализация вершин и ребер определяется набором технико-экономических показателей, который определяет оценку показателей свойств всего графа  $G$  (т.е. свойства структуры исследуемого объекта).

Реализации вершин графа  $r_{ij}, j = \overline{1, g_i}$  где  $g_i$  – число вариантов технической реализации  $i$ -й вершины, могут оценивать с помощью абсолютных или относительных показателей [1], т.е.

$$r_{ij} = r_{ij}(\beta, w_j(r_{ij})) \text{ или } r_{ij} = r_{ij}(\beta, w_j(r_{ij})(w^0)^{-1}). \quad (2)$$

Здесь  $w_j(r_{ij}) = \{w_{1j}(r_{ij}), \dots, w_{\mu j}(r_{ij}), \dots, w_{\gamma j}(r_{ij})\}$  – вектор технико-экономических показателей  $x_i$  при реализации  $r_{ij}$ ;  $\beta = \{\beta_1, \dots, \beta_\mu, \dots, \beta_\gamma\}$  – вектор весовых коэффициентов, определяющие значимость показателей  $w_\mu(r_{ij})$  реализации вершины графа;  $w^0$  – базовый вектор показателей.

В отличие от традиционно рассматриваемых моделей [1], исследуем случай многофункциональности элементов, т.е. элементы участвуют в реализации различных групп функций. Это означает, что при реализации какой-либо группы функций  $k$  в модели (1) можно выделить под-

граф  $G_{\kappa}=(X_{\kappa}, \Gamma_{X_{\kappa}})$ ,  $\kappa=\overline{1, \gamma}$ , где  $\gamma$  – количество групп функций. Элемент  $x_i$  графа  $G$  принадлежит пересечению множеств вершин  $X_{\kappa}$ , участвующих в реализации других групп функций

$$x_i \in \bigcap_{k=1}^{\delta} X_k, \delta \leq \gamma. \quad (3)$$

В качестве основных ограничений рассматриваются следующие:

1. Элементарная совместимость

$$\begin{aligned} \varphi(r_{ij}) * \psi(r_{kv}) \forall x_k \in \Gamma x_i; x_i, x_k \in X, j = \overline{1, g_i}, v = \overline{1, g_k}, i \neq k, \\ \psi(r_{ij}) * \varphi(r_{mv}) \forall x_m \in \tilde{A}x_i^{-1}; x_i, x_m \in X, i = \overline{1, g_i}, \gamma = \overline{1, g_m}, i \neq m. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь функции  $\varphi(r_{ij})$  и  $\psi(r_{kv})$ , характеризующие особенности реализации связей между вершинами графа  $G$ .  $\Gamma x_i$  – прямое отображение вершины  $x_i$  графа  $G$ ;  $\tilde{A}x_i^{-1}$  – обратное отображение вершины  $x_i$ ; \* – описывает определённые соотношения между введёнными функциями.

2. Ограничения на технико-эксплуатационные характеристики, зависящие от элементов структуры системы. На характеристики могут быть наложены ограничения в форме равенства и неравенства в виде

$$f_j(w) \leq f_j^0; j = \overline{1, \eta}; \eta \geq \gamma, \quad (5)$$

где  $w = \{w_i(r_{ij})\}$ ,  $i = \overline{1, N}$  – вектор параметров структуры системы;  $f_j^0$  – числовое ограничение по  $j$ -му уравнению ограничения.

Оптимизация структуры системы каждого вида в общем виде проводится по векторному критерию оценивания качества процесса функционирования [1, 2]

$$F = (f_1(X), \dots, f_{\mu}(X), \dots, f_{\alpha}(X)), \quad (6)$$

где  $f_{\mu}(X)$  – критерий оценивания качества процесса функционирования системы по  $\mu$ -й координате вектора оценивания.

Задача оптимизации состоит в выборе способа действий, т.е. реализации элементов структуры  $X$ , обеспечивающих экстремальное значение критерию (6) при выполнении условий (3) - (5).

Особенность поставленной задачи заключается в том, что она сводится к решению  $\gamma$  подобных задач для реализации конкретных различных групп функций.

Для этого на модели базовой структуры графе  $G$  для каждой реализуемой группы функций выделяют подграф  $G_{\kappa}=(X_{\kappa}, \Gamma_{X_{\kappa}})$ ,  $\kappa=\overline{1, \gamma}$ , в котором определяются  $X_{\kappa}^*$ , удовлетворяющие условиям (3) - (5) и обеспечивающие экстремальное значение критериям

$$F_{\kappa} = (f_1(X_{\kappa}), \dots, f_{\mu}(X_{\kappa}), \dots, f_{\alpha}(X_{\kappa})), \quad (7)$$

где  $f_{\mu}(X_{\kappa})$  – критерий оценивания качества процесса функционирования подграфа  $G_{\kappa}$  по  $\mu$ -ой координате вектора оценивания;  $X_{\kappa}$  – способы действий.

Поставленная задача решается как задача целочисленного программирования. Решение подобных задач подробно описано в [1, 3].

Для обеспечения полного функционирования системы, удовлетворяющего условиям (4), (5), (7), получаем множество решений  $X^* = \{X_{\kappa}^*\}$ ,  $\kappa=\overline{1, \gamma}$ , где  $X_{\kappa}^*$  – оптимальные решения, удовлетворяющие условиям (3) и ограничениям вида (5), относящихся к  $\kappa$ -й группе реализуемых функций.

Реализации элементов  $x_{ik}^*$  модели структуры системы  $G$  для разных групп функций могут быть различны из-за различий условий (5) для групп функций. Из этих оптимальных реализаций выбираем  $x_{ik}^{*0}$ , которые удовлетворяют максимальному (минимальному) уровню по каждому виду ограничений (5) (виды ограничений для различных групп функций одинаковы)

$$x_{ik}^{*0} \rightarrow \max(\min) f_j^0, \quad (8)$$



Для выбранных  $x_{ik}^{*0}$  определяют оптимальное значение общего критерия (6) при выполнении всех ограничений (5).

*Пример выбора элементов.* Графическая модель базовой функциональной структуры канала теплогидравлических параметров системы управления реакторного отделения представлена на рис. 1, где в терминах [5]: 1 – аппаратура контроля теплогидравлических параметров (АКТП); 6 – оперативный дисплей; 8 – HUB (коммутатор); 10 – пульт управления; 11 – аппаратура логической обработки сигналов (АЛОС); К2 – измерительные блоки; АЗ – аппаратура аварийной защиты; упр – блоки управления.

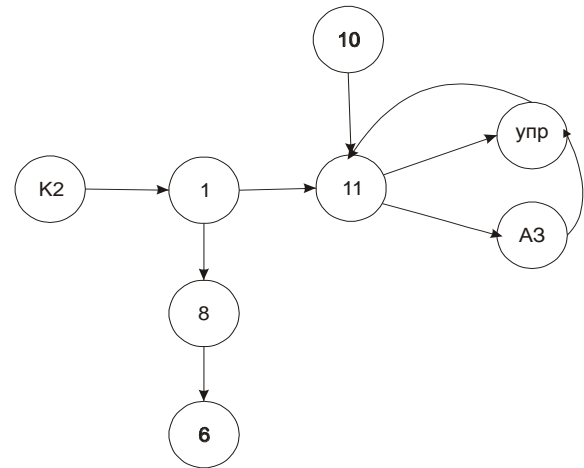


Рис. 1. Базовая модель структуры канала теплогидравлических параметров

Реализации вершин графа  $G$  опишем матрицей  $R$  размерностью  $N \times g$ , где  $N = 8$  – число вершин,  $g = 4$  – число вариантов технической реализации вершин.

Основные показатели вершин: стоимость реализации  $W_i(r_{ij})$  и показатель надежности  $P_j(r_j)$ . В качестве вариантов реализации вершин графа будем рассматривать функциональные элементы одного определенного производителя соответственно с коэффициентами резервирования 1, 2, 3, 4. Ограничения по параметрам надежности в соответствии с ГОСТ 24.701-86 [6] задаются не для всей системы, а для каждой выполняемой функции отдельно, и равные.

Решение поставленной задачи по описанному выше алгоритму с учетом ограничений (табл. 1) позволяет получить результаты решения по каждой группе функций (табл. 2). Используя условия (8), получим значения коэффициентов резервирования для элементов структуры:

$$K2 - 4; 1 - 4; 10 - 2; 11 - 3; 8 - 2; 6 - 3; Упр - 3; АЗ - 3.$$

Таблица 1

Ограничения на функции

Функции	Вероятность безотказной работы
Автоматическое управление	$P_{зад} \geq 0.96$
Аварийный режим	$P_{зад} \geq 0.97$
Измерение	$P_{зад} \geq 0.95$
Управление	$P_{зад} \geq 0.96$

Таблица 2

Характеристики функций

Функции	Стоимость	Надежность	Резервирование
Автоматическое управление	301862	0.966	K2 – 3; 1 – 3; 11 – 2; Упр - 3
Аварийный режим	416863	0.977	K2 – 4; 1 – 4; 11 – 4; Упр – 3; АЗ – 3; 8 – 2
Измерение	15967	0.964	10 – 2; 11 – 2; 1 – 3; 8 – 2; 6 – 3
Управление	27660	0.956	10 – 2 ; 11 – 2; Упр – 3

Полученные результаты решения подтверждают практическую реализацию структуры канала теплогидравлических параметров системы управления реакторного отделения [5].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сафронов В.В. Методы оптимизации структур сложных систем / В.В. Сафронов. Саратов: СВВКИУ РВ, 1993. 94 с.
2. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н.Моисеев. М.: Наука, 1981. 488 с.
3. Цвиркун А.Д. Структура сложных систем / А.Д. Цвиркун. М.: Сов. радио, 1975. 200 с.
4. Корбут А.А. Дискретное программирование / А.А. Корбут, Ю.Ю. Финкельштейн. М. Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1969. 370 с.
5. Комплекс АСУЗ-03Р системы управления и защиты исследовательского ядерного реактора ПИК /А. Зайкин и др. // Современные технологии автоматизации. 2002. №3. С. 34-44.
6. ГОСТ 24.701-86. Надежность автоматизированных систем управления. Основные положения.

**Семагин Андрей Александрович** –  
студент Саратовского государственного технического университета

**Чуркин Геннадий Максимович** –  
доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного  
технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 681.5

**М.Ф. Степанов, К.А. Кулаков**

### **АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ С НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ**

*Предлагается подход к решению задач анализа и синтеза систем автоматического управления объектом с нелинейностью в непроцедурной постановке. Планирование действий по решению непроцедурно поставленных задач осуществляется в рамках аксиоматической теории, построенной на основе формализации знаний о методах решения задач управления объектом с нелинейностью в виде модели множества формализованных задач. Проведены исследования построенной аксиоматической теории решения задач анализа и синтеза систем автоматического управления объектом с нелинейностью.*

Автоматическое решение задач, аксиоматическая теория, линеаризация, решение задач в непроцедурной постановке, простые нелинейные системы, формализация знаний

M.F. Stepanov, K.A. Kulakov

## AUTOMATIC PROBLEM SOLVING OF THE ANALYSIS AND SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEMS BY PLANT WITH NONLINEARITY

*The approach to tasks solving the analysis and synthesis of control systems by plant with nonlinearity in not procedural statement is offered. Scheduling of solution not procedural tasks statement in view is carried out within of the axiomatic theory built on the basis of formalising of knowledge of methods of tasks solving of control system of plant with nonlinearity as a model of a set of formalized tasks. Research of the built axiomatic theory of tasks solving of the analysis and synthesis of control systems by plant with nonlinearity are carried out.*

Automatic problem solving, the axiomatic theory, linearization, problem solving in not procedural statement, simplese nonlinear systems, formalising of knowledge

Развитие теории автоматического управления (ТАУ), компьютерных технологий создали предпосылки перехода к полной автоматизации процесса проектирования систем автоматического управления (САУ). При этом задачи синтеза и анализа САУ задаются в не-процедурной постановке, что требует применения методов искусственного интеллекта для планирования действий по решению задачи на основе формализации знаний проблемной области ТАУ. Для исследования линейных систем управления разработаны удобные формы математического описания и эффективные методы анализа и синтеза. Однако применение этих методов для нелинейных систем общего вида невозможно.

В связи с тем, что реальные системы являются в большей или меньшей степени нелинейными, это направление исследования ТАУ является актуальным. В процессе развития ТАУ разработаны различные математические методы анализа и синтеза нелинейных систем, каждый из которых применим для определенного класса задач. Наиболее широко используемыми методами исследования нелинейных систем являются [1]: фазовой плоскости; функций Ляпунова; основанные на принципе линеаризации; исследования абсолютной устойчивости; математическое моделирование как основная процедура системного анализа.

Для исследования выбраны простые нелинейные системы, которые можно разделить на линейную и нелинейную части. В качестве ключевых для исследования данного класса нелинейных систем выбраны методы, основанные на принципе гармонической линеаризации.

При этом для типовых нелинейностей используются табличные эквивалентные комплексные коэффициенты усиления, а для произвольных нелинейностей расчет соответствующих коэффициентов производится на основе результатов моделирования. Однако результаты линеаризации являются приближенными, что не всегда позволяет получить адекватную модель. Как следствие – проектирование САУ объектами с нелинейностью является более итерационным и рутинным, чем для линейных систем.

Поэтому актуальна проблема автоматического решения задач анализа и синтеза САУ объектом с нелинейностью в не-процедурной постановке. Для её решения необходима формализация знаний на основе подхода [1] расширением модели множества формализованных задач синтеза и анализа линейных САУ:  $M_{nn} = \langle P, D, O \rangle$ , где  $M_{nn}$  – модель множества формализованных задач анализа и синтеза *простых нелинейных САУ*;  $P$  – множество пред-метов;  $D$  – множество действий;  $O$  – множество отношений. Планирование решений задач осуществляется в формализме аксиоматической теории, создаваемой на основе  $M_{nn}$  и явля-

ющейся исчислением секвенций  $T_{nn} = \langle \Phi, \Pi, A, P \rangle$ , где  $\Phi, \Pi$  – алфавиты исчисления, включающие обозначения констант (фактов) и переменных,  $A$  – аксиомы исчисления,  $P$  – правила вывода [2]. Для исчислений необходимым является исследование их свойств (полнота, разрешимость, непротиворечивость).

В теории  $T_{nn}$  справедлива полнота на фиксированном этапе обучения, причем только в смысле Робинсона [3]. Задан некоторый класс  $B$  выражений, описанный в словаре множества аксиом  $A$  теории  $T_{nn}$ . Необходимо установить, доказуемость в  $T_{nn}$ , т.е. выводимость из  $A$  любого выражения  $B_i \in B$ . В положительном случае теория  $T_{nn}$  является полной относительно формул класса  $B$ .

Каждая аксиома в  $A$  состоит из атрибутов, которые, в свою очередь, представляют список литер. Литеру называют базовой, если она невыразима через другие литеры одного уровня. Литеры, не являющиеся базовыми, называют производными.

Аксиоматическая теория анализа и синтеза САУ объектом с нелинейностью  $T_{nn}$  является открытой и проблемно-ориентированной. Истинность используемых в ней утверждений привносится извне, из предметной области ТАУ.

*Лемма 1.* В заданной аксиоматике  $A$  теории  $T_{nn}$  каждая производная литера для избегания самовыражения выразима через базовые литеры.

*Доказательство.* В теории  $T_{nn}$  базовые литеры входят только в antecedentes аксиом, а их сукцеденты, т.е. результаты выполнения действий содержат только производные литеры, т.е. по построению базовая литера не может входить в сукцедент никакой аксиомы, при этом производная литера может входить в antecedent какой-либо аксиомы только тогда, когда она одновременно входит в сукцедент другой аксиомы.

*Лемма 2.* Аксиоматическая теория  $T_{nn}$  автоматических решений задач анализа и синтеза САУ объектом с нелинейностью компактна.

*Доказательство.* Множество конкретных отношений и констант, справедливых в аксиоматике  $A$ , составляет словарь  $W$  теории  $T_{nn}$ . Выделим из  $W$  базовый словарь  $W^B$ , включающий отношения и константы базовых литер. Остальные отношения и константы отнесем к производному словарю  $W^P$ . Таким образом, аксиоматическая теория  $T_{nn}$  автоматических решений задач анализа и синтеза САУ объектом с нелинейностью компактна по построению, так как одновременно выполняются условия:  $W = W^B \cup W^P$  и  $W^B \cap W^P \neq \emptyset$ .

*Теорема 1.* Аксиоматическая теория автоматических решений задач анализа и синтеза САУ объектом с нелинейностью полна в смысле Робинсона.

*Доказательство.* В силу леммы 1 в заданной аксиоматике  $A$  каждая производная литера выразима через базовые литеры. В силу леммы 2 аксиоматическая теория  $T_{nn}$  компактна. Таким образом, аксиоматическая теория автоматических решений задач анализа и синтеза САУ объектом с нелинейностью полна в смысле Робинсона.

Для установления непротиворечивости аксиоматической теории  $T_{nn}$  автоматических решений задач анализа и синтеза САУ объектом с нелинейностью необходимо исследовать непротиворечивость правил вывода  $P$  и аксиоматики  $A$ .

*Лемма 3.* Аксиоматика  $A$  теории решений задач анализа и синтеза САУ объектом с нелинейностью  $T_{nn}$  непротиворечива на модели множества задач  $M_{nn}$ .

*Доказательство.* По построению каждая собственная аксиома  $A$  соответствует операции модели  $M_{nn}$ , являющейся процедуральным определением предметов, их атрибутов (свойств, характеристик или форм математического описания предметов), указанных в сукцеденте аксиом. Следовательно, собственные аксиомы  $A$  истинны на модели  $M_{nn}$  по по-

строению. Правила вывода аксиоматической теории  $T_{nn}$  непротиворечивы. Поэтому из аксиом  $A$  нельзя вывести контрарные высказывания. Следовательно, аксиоматика  $A$  теории решений  $T_{nn}$  непротиворечива на модели множества задач  $M_{nn}$ .

*Лемма 4.* Правила вывода  $A$  теории решений задач анализа и синтеза САУ объектом с нелинейностью  $T_{nn}$  непротиворечивы на модели множества задач  $M_{nn}$ .

*Доказательство.* В теории решений  $T_{nn}$  задач анализа и синтеза САУ объектом с нелинейностью использованы правила вывода, приведённые в [2], где также доказана их непротиворечивость.

*Теорема 2.* Аксиоматическая теория автоматических решений задач анализа и синтеза САУ объектом с нелинейностью непротиворечива.

*Доказательство.* В силу леммы 3 аксиоматика  $A$  теории решений  $T_{nn}$  непротиворечива. В силу леммы 4 правила вывода  $P$  теории решений  $T_{nn}$  непротиворечивы. Поэтому в аксиоматической теории  $T_{nn}$  недоказуемы одновременно контрарные секвенции, т.е. соответствующая задача имеет решение либо не имеет, но не одновременно.

*Теорема 3.* Аксиоматическая теория автоматических решений задач анализа и синтеза САУ объектом с нелинейностью разрешима.

*Доказательство.* В качестве механизма поиска вывода решений задач анализа и синтеза нелинейных САУ используется планирующая искусственная нейронная сеть (ПИНС). Алгоритм работы ПИНС является разрешимым [2], т.е. для каждого утверждения за конечное число шагов позволяет ответить на вопрос: «Доказуемо или нет данное утверждение?». В силу *теоремы 1* аксиоматическая теория  $T_{nn}$  полна в смысле Робинсона. В силу того, что используемый в теории  $T_{nn}$  алгоритм поиска вывода является разрешимым, аксиоматическая теория автоматических решений задач анализа и синтеза САУ объектом с нелинейностью разрешима.

Изложенный подход реализован в системе ИНСТРУМЕНТ-3м-И [4] декларативно в виде модели знаний  $M_{nn} = \langle \Pi, D, O \rangle$  о методах решения задач анализа и синтеза САУ простыми нелинейными объектами. Элементарные операции модели  $M_{nn}$  заданы процедурно в виде программных модулей библиотеки динамической загрузки. На модели  $M_{nn}$  решена не-процедурно поставленная задача синтеза системы стабилизации напряжения энергетической системы на базе дизель-генератора с нелинейностью типа «люфт». Объект управления представляет систему дизель-генератор, которая состоит из следующих основных функциональных частей (рис. 1): дизельный двигатель; турбокомпрессор (ТК); компрессор (1); газовая турбина (2); выпускной коллектор (3); впускной коллектор (4); регулятор частоты вращения (РЧВ); электрический генератор постоянного тока и описывается уравнениями вида:  $\dot{x} = Ax + Bu + Hf$ ,  $y = Cx$ , где  $x = colon(\omega_d, \omega_k, \rho, \xi, \omega_r, \psi, U_s)$  – вектор переменных состояния;  $u = h_p$  – управление;  $f = \alpha_d$  – возмущение;  $y = colon(\omega_d, \omega_k, \rho, U_s)$  – вектор из-

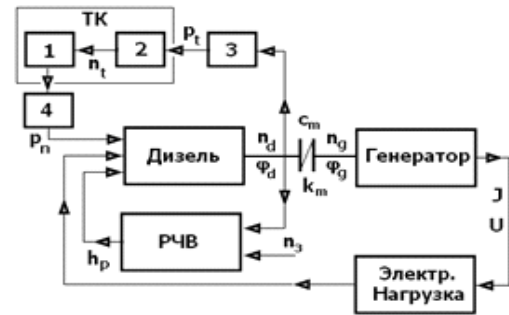


Рис. 1. Функциональная схема объекта управления

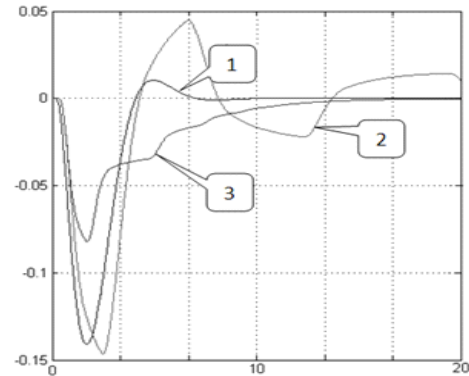


Рис. 2. Переходные процессы по напряжению

меряемых переменных ОУ;  $\omega_d$  – относительная угловая скорость коленчатого вала двигателя;  $\omega_k$  – относительная угловая скорость ротора турбокомпрессора;  $\rho$  – относительное изменение давления наддува;  $\xi$  – относительное давление газа у газотурбины;  $\omega_r$  – относительная угловая скорость ротора генератора;  $U_z$  – напряжение, получаемое на генераторе;  $h_p$  – перемещение рейки топливного насоса;  $\alpha_d$  – коэффициент изменения нагрузки.

Нелинейный элемент в объекте управления представляет упругую муфту, которая расположена между коленчатым валом дизеля и ротором генератора. Упругая муфта – это нелинейность типа «люфт». Заданы требования на отклонение напряжения на выходе генератора ( $U_z^*$ ) от номинального, а также и к времени регулирования ( $t_p^*$ ).

Результаты моделирования САУ с синтезированным регулятором представлены на рис. 2, где 1 – график переходного процесса без нелинейного элемента, 2 – график переходного процесса с нелинейным элементом, с законом управления, построенным без учета нелинейности; 3 – график переходного процесса с нелинейным элементом, с законом управления, построенным с учетом нелинейного элемента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ким Д.П. Теория автоматического управления : учеб. пособие. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д.П. Ким. М.: Физматлит, 2004.
2. Степанов М.Ф. Автоматическое решение формализованных задач теории автоматического управления / М.Ф. Степанов. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000.
3. Степанов М.Ф. Интеллектуальные самоорганизующиеся системы автоматического управления / М.Ф. Степанов. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2002.
4. Ефимов Е.И. Решатели интеллектуальных задач / Е.И. Ефимов. М.: Наука, 1982.
5. Степанов М.Ф. Система автоматического синтеза систем автоматического управления ИНСТРУМЕНТ-3м-И (САС САУ ИНСТРУМЕНТ-3м-И): Свидетельство Роспатента об офиц. регистр. программы для ЭВМ. № 2003612369. 2003.

**Степанов Михаил Федорович** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Кулаков Кирилл Андреевич** –

аспирант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 629.7.05.001

**Д.Л. Лисицкий, Л.А. Лисицкий**

## **АНАЛИЗ И СИНТЕЗ САУ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ ПРИВОДА УПРАВЛЯЮЩИХ ОРГАНОВ**

*Рассматриваются системы автоматического управления, на органы управления объектов которых наложены ограничения по величине и скорости отклонения. Предложены методики синтеза таких систем,*

позволяющие максимизировать динамическую точность системы, или минимизировать отношение ограничений по скорости и отклонению.

Автоматическое управление, ограничения по величине и скорости отклонения, синтез

**D.L. Lisitsky, L.A. Lisitsky**

## ANALYSIS AND SYNTHESIS OF ACS OF MOVING OBJECTS WITH A NONLINEAR DRIVE OF CONTROL ELEMENTS

*The article discusses automatic control systems of an object which a control element has limits on amount and speed of deviation. The article presents the methods of synthesis, which allow to maximize a dynamic accuracy of the system or to minimize the ratio of the speed deviation to the control element deviation.*

Automatic control systems, limits on amount and speed of deviation, synthesis

Обязательным элементом конструкции САУ подвижного объекта является привод, перемещающий управляющие органы объекта. Величина отклонения исполнительного органа привода и скорость его отклонения ограничены как конструктивными особенностями объекта управления, так и конечной мощностью привода.

С учетом этих ограничений структурную схему системы управления движущимся одномерным объектом можно представить в виде, изображенном на рис. 1, на котором использованы следующие обозначения:  $W_o(s)$  – передаточная функция объекта управления;  $W_p(s)$  – передаточная функция регулятора;  $W_{\Pi}(s)$  – передаточная функция линейной части привода; НЭ-1 – нелинейное звено типа «ограничение»; НЭ-2 – нелинейное звено типа «интегратор с ограничением выходного сигнала»;  $X$  – выходная переменная системы;  $X_3$  – заданное значение выходной переменной;  $U$  – управляющая переменная объекта.

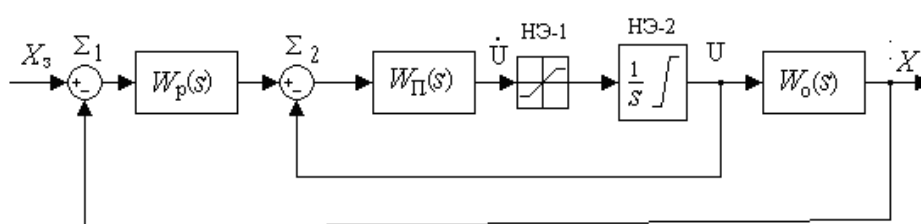


Рис. 1. Структурная схема САУ движущимся объектом

Нелинейные звенья НЭ-1 и НЭ-2 составляют нелинейную часть системы, остальные звенья – линейную. При определенных условиях в таких системах могут возникнуть автоколебания большой амплитуды, что приводит к их неработоспособности. Для исследования условий возникновения автоколебаний использовались методы гармонической линеаризации и фазовой границы устойчивости (ФГУ) [2].

Метод ФГУ позволяет графоаналитически исследовать устойчивость гармонически линеаризованных нелинейных систем. Согласно этому методу границей устойчивости системы в области фазовой частотной характеристики линейной части является кривая, называемая ФГУ, которая строится по следующему правилу:

1) в одной системе координат строятся графики логарифмических амплитудной и фазовой частотных характеристик (ЛАХ) и (ЛФХ) линейной части системы и графики смещенных эквивалентных логарифмических амплитудных и фазовых частотных характеристик (ЭЛАХ) и (ЭЛФХ) нелинейной части системы, соответствующие смещенной эквивалентной частотной передаточной функции:

$$W_H^*(A, j\omega) = -1/W_H(A, j\omega), \quad (1)$$

где  $W_H(A, j\omega)$  – эквивалентная частотная передаточная функция нелинейной части;  $A, \omega$ ,

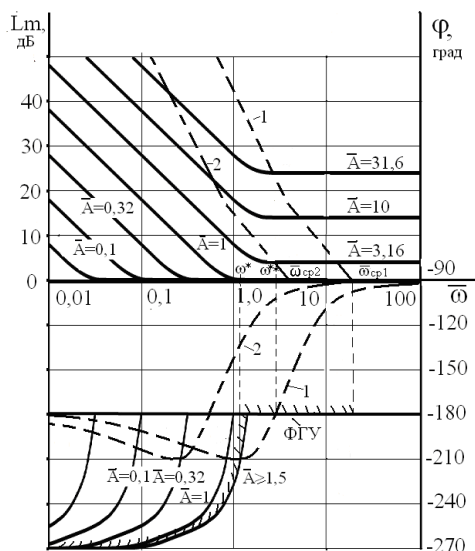


Рис. 2. Диаграмма устойчивости

если с увеличением частоты ЛФХ линейной части пересекает ФГУ, переходя с заштрихованной стороны на незаштрихованную. Система находится на границе устойчивости, если графики ЛФХ линейной части и ФГУ бесконечно сближаются. Запас по фазе в нелинейной постановке задачи определяется как минимальное расстояние между ЛФХ линейной части и ФГУ вдоль оси ординат.

Смещенные нормированные ЭЛАХ и ЭЛФХ нелинейной части исследуемой системы получены по методике, описанной в [1], и изображены на рис. 2 сплошными линиями. Смещенная нормированная эквивалентная частотная передаточная функция нелинейной части системы равна

$$\bar{W}_H^*(\bar{A}, j\bar{\omega}) = -j\bar{\omega}/W_H(\bar{A}, j\bar{\omega}), \quad (2)$$

где  $W_H(\bar{A}, j\bar{\omega})$  – эквивалентная частотная передаточная функция нелинейной части системы,  $\bar{\omega} = \omega b_2/b_1$  – нормированная частота;  $\bar{A} = A/b_1$  нормированная амплитуда входного сигнала нелинейной части;  $b_1$  – максимальное значение модуля скорости отклонения управляющего органа;  $b_2$  – максимальное значение модуля отклонения управляющего органа.

Нормировка используется для придания графикам инвариантности к величинам ограничений. Чтобы нормировка не влияла на результаты оценки устойчивости системы, для построения графиков ЛАХ и ЛФХ линейной части также должна использоваться нормированная частотная передаточная функция линейной части системы:

$$\bar{W}_L(j\bar{\omega}) = \frac{1}{j\bar{\omega}} W_L(j\bar{\omega}), \quad (3)$$

которая для данной системы будет определяться выражением

$$\bar{W}_L(j\bar{\omega}) = \frac{1}{j\bar{\omega}} W_\Pi(j\bar{\omega})[1 + W_P(j\bar{\omega})W_O(j\bar{\omega})]. \quad (4)$$



Так как значение нормированной частоты зависит от отношения величин ограничений  $b_2/b_1$ , при изменении этого отношения графики нормированных ЛАХ и ЛФХ линейной части системы будут перемещаться параллельно себе вдоль оси частот.

С использованием передаточной функции (4) и правила нормировки проведен анализ влияния степени астатизма линейной части системы и ограничений  $b_2, b_1$  на взаимное положение графиков ЛАХ и ЛФХ линейной части и графиков ЭЛАХ и ЭЛФХ нелинейной части, а соответственно, на устойчивость гармонически линеаризованной замкнутой системы. При этом предполагалось, что линейная часть системы минимальнофазовая и система в линейной постановке задачи устойчивая. В результате анализа установлено:

1) если линейная часть системы статична, то рассматриваемые нелинейности не влияют на устойчивость замкнутой системы, так как график ЛФХ линейной части не опускается ниже уровня  $-180$  град. и не может пересечь ФГУ;

2) если линейная часть системы обладает астатизмом второго и более высоких порядков, то замкнутая система при больших отклонениях от положения равновесия будет неустойчивой или находиться на границе устойчивости, так как ЛФХ линейной части будет пересекать ФГУ или соприкасаться с ней;

3) если линейная часть системы обладает астатизмом первого порядка, то замкнутая система может быть как устойчивой, так и неустойчивой в зависимости от свойств линейной части и отношения величин ограничений  $b_2/b_1$ ; далее рассматриваются только системы, у которых линейная часть обладает астатизмом первого порядка;

4) если нормированная частота среза линейной части системы  $\bar{\omega}_{cp} < 1,5$ , то ФГУ совпадает с одним из графиков смещенной нормированной ЭЛФХ и при изменении отношения ограничений  $b_2/b_1$  перемещается вдоль оси частот вместе с графиками ЛАХ и ЛФХ линейной части таким образом, что запас устойчивости системы в нелинейной постановке задачи остается неизменным;

5) если  $\bar{\omega}_{cp} \geq 1,5$ , то ФГУ совпадает с графиком ЭЛФХ для  $\bar{A} \geq 1,5$ , который фактически является границей смещения нормированных ЛАХ и ЛФХ линейной части в высокочастотную область; в этом случае при увеличении отношения ограничений  $b_2/b_1$  или при увеличении полосы пропускания линейной части системы запас устойчивости снижается, а при уменьшении этого отношения или при уменьшении полосы пропускания линейной части – увеличивается.

Проведенный анализ позволил предложить методику синтеза рассматриваемого класса нелинейных систем. При синтезе САУ необходимо исходить из того, что ограничения оказывают влияние на динамику системы только при достаточно больших отклонениях объекта от положения равновесия, а при малых отклонениях система работает как линейная. Оба режима работы – при малых и больших отклонениях – являются вполне равноправными. Поэтому вполне логичным представляется синтез САУ, исходя из условий обеспечения заданного качества регулирования при малых отклонениях в линейной постановке задачи, с последующей проверкой влияния ограничений на запас устойчивости системы в нелинейной постановке задачи. Разумным будет также требование обеспечения запаса по фазе в системе в нелинейной постановке задачи не менее запаса по фазе в линейной постановке или не менее  $60^\circ$ .

Перед разработчиком САУ подвижного объекта часто возникает задача выбора ее параметров таким образом, чтобы объект отслеживал входные воздействия с возможно большей динамической точностью и минимизировалось отношение ограничений  $b_1/b_2$ , так как при этом минимизируются вес, габариты, энергопотребление и стоимость привода. При заданной структуре регулятора, которая обычно обусловлена возможностью получения информации о координатах объекта, эта задача фактически сводится к синтезу такого регулятора, при котором ЛАХ и ЛФХ линейной части системы находятся в области максимально возможно высоких нормированных частот, и при этом обеспечивается приемлемое качество регулирования. Перечисленные выше требования удовлетворяются, если система имеет приемлемое качество

регулирования в линейной постановке задачи, ее ФГУ совпадает с графиком смещенной эквивалентной ЛФХ нелинейной части системы для  $\bar{A} \geq 1,5$ , а запас по фазе в нелинейной постановке не меньше запаса по фазе в линейной постановке задачи или не менее  $60^\circ$ .

Возможны два варианта постановки задачи синтеза.

1. Если требования к качеству работы системы в линейной постановке задачи известны и требуется определить величины ограничений, то в процессе синтеза должно минимизироваться отношение  $b_1/b_2$ . Задача может решаться в следующей последовательности:

1) определяются параметры регулятора в линейной постановке задачи, исходя из требований к качеству регулирования, некоторым известным методом;

2) задаваясь произвольной величиной отношения ограничений (например,  $(b_1/b_2)_H = 1$ ), строятся графики нормированных ЛАХ и ЛФХ линейной части на графиках смещенных нормированных ЭЛАХ и ЭЛФХ нелинейной части, и фиксируется нормированная частота среза ( $\bar{\omega}_{cp1}$ );

3) графики нормированных ЛАХ и ЛФХ линейной части перемещаются параллельно себе вдоль оси частот таким образом, чтобы график нормированной ЛФХ линейной части системы не пересекал графика смещенной нормированной ЭЛФХ нелинейной части для  $\bar{A} \geq 1,5$ , а минимальное расстояние между ними было равно  $60^\circ$  или запасу по фазе в линейной постановке задачи, и фиксируют новое значение нормированной частоты среза линейной части системы ( $\bar{\omega}_{cp2}$ );

4) вычисляется минимально допустимая величина отношения ограничений по формуле

$$(b_1/b_2)_{\min} = (b_1/b_2)_H \cdot \bar{\omega}_{cp1} / \bar{\omega}_{cp2}; \quad (5)$$

5) задавшись, например, из конструктивных соображений, величиной одного из ограничений, по отношению  $(b_1/b_2)_{\min}$  определяется второе ограничение.

2. Заданы ограничения, накладываемые на скорость и отклонение управляющего органа объекта. Необходимо определить параметры регулятора, обеспечивающего наряду с максимальной возможной полосой пропускания линейной части системы приемлемое качество регулирования при работе привода как линейного элемента.

Так как ширина полосы пропускания определяется частотой среза, а при фиксированных ограничениях максимальная частота среза линейной части САУ достигается при максимизации нормированной частоты среза смещенной линейной части САУ, задача сводится к синтезу такого регулятора, при котором смещенные ЛАХ и ЛФХ линейной части системы находятся в области максимально возможно высоких (с точки зрения устойчивости нелинейной системы) нормированных частот и при этом обеспечивается приемлемое качество регулирования при работе привода как линейного элемента. Далее, учитывая, что при нормированной частоте среза линейной части САУ  $\bar{\omega}_{cp} = 1,5$  смещенная ЛФХ линейной части системы занимает положение близкое к оптимальному, задача может решаться методом последовательного приближения:

1) выбирая частоту среза линейной части САУ по формуле

$$\omega_{cp} = 1,5b_1/b_2, \quad (6)$$

и, задаваясь остальными требованиями к качеству регулирования САУ в линейной постановке задачи, осуществляется синтез регулятора в линейной постановке задачи известным методом;

2) строятся графики смещенных ЛАХ и ЛФХ линейной части САУ на графиках смещенных ЭЛАХ и ЭЛФХ нелинейной части САУ и определяется ФГУ;

3) если ФГУ находится левее графика смещенной ЭЛФХ для  $\bar{A} \geq 1,5$  или запас по фазе больше  $60^\circ$ , то требования к качеству регулирования в линейной постановке задачи корректируются в сторону увеличения быстродействия и процесс синтеза повторяется;

4) если ФГУ совпадает с графиком смещенной ЭЛФХ для  $\bar{A} \geq 1,5$ , но запас по фазе меньше  $60^\circ$ , то требования к качеству регулирования в линейной постановке задачи корректируется для уменьшения быстродействия и процесс синтеза повторяется;

5) процесс синтеза повторяется до тех пор, пока ФГУ не совпадет с графиком смещенной ЭЛФХ нелинейной части для  $\bar{A} \geq 1,5$ , а запас по фазе не будет равен  $60^\circ$ .

Опыт показал, что с достаточной для практических целей точностью вторая задача синтеза может быть решена за 2 - 3 итерации.

Эффективность предлагаемой методики синтеза иллюстрируется на примере САУ вертикальным движением центра масс вертолета, которое описывается уравнением [3]

$$\ddot{H} = Y^V V_y + Y_\varphi^\varphi \varphi, \quad (7)$$

где  $H$  – вариация высоты полета;  $V_y$  – вариация вертикальной скорости;  $\varphi$  – вариация отклонения управляющего органа общего шага несущего винта;  $Y^V = -0,62 \text{ с}^{-1}$ ;  $Y_\varphi = 74 \text{ м}/(\text{с}^2 \cdot \text{рад})$  – постоянные коэффициенты. Передаточная функция линейной части привода выбрана равной  $W_\Pi(s) = k_\Pi = 20$ .

Регулятор, обеспечивающий замкнутой системе в линейной постановке задачи время переходного процесса  $t_p = 1 \text{ с}$ , перерегулирование 6 %, коэффициент передачи замкнутой системы  $k_3 = 1$ , выберем в традиционном виде [3]:

$$\varphi = i_H (H_3 - H) + i_V V_y, \quad (8)$$

где  $i_H = -0,048$ ,  $i_V = -0,12$  – постоянные коэффициенты, значения которых определялись методом модального управления;  $H_3$  – заданная высота полета.

Нормированная частотная передаточная функция линейной части системы будет равна

$$\bar{W}_\Pi(j\bar{\omega}) = k_\Pi [T_O(j\bar{\omega})^2 + (k_O k_p T_p + 1)(j\bar{\omega}) + k_O k_p] / ((j\bar{\omega})^2 (T_O(j\bar{\omega}) + 1)), \quad (9)$$

где  $k_O = -Y^\varphi / Y^V = 119,15(\text{м} \cdot \text{с})/\text{рад}$  – коэффициент передачи объекта;  $T_O = 1/(-Y^V) = 1,61 \text{ с}$  – постоянная времени объекта;  $k_p = i_H$  – коэффициент передачи регулятора;  $T_p = i_V / i_H$  – постоянная времени регулятора.

Определим минимальную величину отношения ограничений. Графики нормированных ЛАХ и ЛФХ линейной части при  $(b_1/b_2)_H = 1$  приведены на рис. 2 (пунктирный график 1). Построив ФГУ, из графиков рис. 2 видно, что график нормированной ЛФХ линейной части системы пересекает ФГУ дважды: в точке на частоте  $\bar{\omega}^*$ , переходя с заштрихованной стороны на незаштрихованную (колебания устойчивы), и в точке с частотой  $\bar{\omega}^{**}$ , переходя с незаштрихованной стороны на заштрихованную (колебания неустойчивы). Так как точка с частотой  $\bar{\omega}^*$  соответствует колебаниям с большей амплитудой, в системе будут существовать устойчивые автоколебания с частотой  $\omega^* = \bar{\omega}^* (b_1/b_2)_H = 1,11/\text{с}$ , что подтверждается математическим моделированием (рис. 3).

Зафиксируем нормированную частоту среза в первом положении графиков ЛАХ и ЛФХ ( $\bar{\omega}_{cp1} = 20$ ). Переместим нормированные графики ЛАХ и ЛФХ параллельно себе влево таким образом, чтобы запас по фазе в системе в нелинейной постановке задачи был равен  $60^\circ$  (рис. 3, графики пунктиром с индексом 2). Зафиксируем новую частоту среза линейной части системы  $\bar{\omega}_{cp2} = 4$ . По формуле (5) определим минимальную допустимую величину отношения ограничений, наложенных на управление

$$(b_1/b_2)_{\min} = (b_1/b_2)_H \cdot \bar{\omega}_{cp1} / \bar{\omega}_{cp2} = 20/4 = 5. \quad (10)$$

Выберем максимальное отклонение управляющего органа объекта из конструктивных соображений  $\varphi_{\max} = 0,1$  рад. Тогда минимально допустимая максимальная скорость отклонения управляющего органа будет равна

$$\dot{\varphi}_{\max} = (b_1 / b_2)_{\min} \cdot \varphi_{\max} = 0,5 \text{ рад/с.} \quad (15)$$

Проверка результатов синтеза проводилась математическим моделированием при большом входном воздействии. Для оценки эффективности предложенной методики моделирование проводилось не только при выбранной величине  $\dot{\varphi}_{\max}$ , но в два и пять раз меньшей ( $\dot{\varphi}_{\max} = 0,25$  рад/с,  $\dot{\varphi}_{\max} = 0,1$  рад/с), и в 2000 раз большей ( $\dot{\varphi}_{\max} = 1000$  рад/с). Результаты моделирования приведены на рис. 3, из которых следует, что в нелинейной постановке задачи при выбранном отношении величин ограничений перерегулирование практически не превышает перерегулирование в линейной системе (соответственно, 7,2 и 6%). При  $\dot{\varphi}_{\max} = 1000$  рад/с перерегулирование незначительно уменьшается до 4,3%. При уменьшении максимальной скорости в два раза по сравнению с выбранной перерегулирование увеличивается почти в четыре раза и достигает 26%, а при уменьшении максимальной скорости в четыре раза система становится неустойчивой.

Кроме того, исследовалось влияние изменения полосы пропускания линейной части системы на динамику замкнутой нелинейной системы. Для этого параметры регулятора выбирались таким образом, что время регулирования системы в линейной постановке задачи уменьшалось в два и четыре раза по сравнению с первоначально выбранным ( $t_p = 0,5$  с,  $t_p = 0,25$  с) при сохранении перерегулирования 6%. Результаты моделирования приведены на рис. 4, из которых следует, что при уменьшении времени регулирования в два раза перерегулирование возрастает более чем в четыре раза до 32%, а при уменьшении времени регулирования в четыре раза система становится неустойчивой.

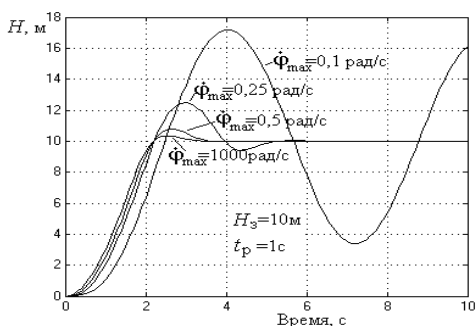


Рис. 3. Графики переходных процессов

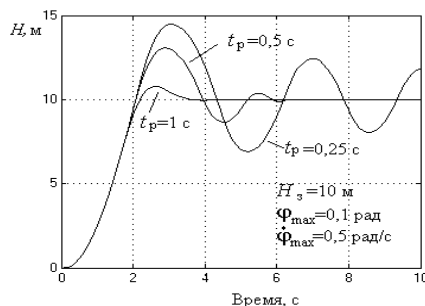


Рис. 4. Графики переходных процессов

Таким образом, из результатов моделирования следует, что предлагаемые методики анализа и синтеза позволяют эффективно и точно определять минимально допустимую величину отношения ограничений при заданном быстродействии системы в линейной постановке задачи и максимально достижимое быстродействие, и, соответственно, и динамическую точность системы при заданном отношении величин ограничений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лисицкий Д.Л. Гармоническая линеаризация сложных динамических нелинейных звеньев / Д.Л. Лисицкий // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. XXIII Междунар. науч. конф. Т.10. Саратов: СГТУ, 2010. С. 135-138.
2. Рабинович Л.В. Проектирование следящих систем / Л.В. Рабинович, Б.И. Петров, В.Г. Терсков. М.: Машиностроение, 1969. 500 с.

3. Кожевников В.А. Системы автоматического управления полетом вертолета / В.А. Кожевников. М.: Машиностроение, 1974. 196 с.

**Лисицкий Денис Леонтьевич** –

аспирант кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

**Лисицкий Леонтий Анатольевич** –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 519.71

**И.В. Луценко**

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ САМОЛЕТА**

*Осуществляется построение математической модели вспомогательной силовой установки самолета, основными узлами которой являются газотурбинный двигатель и управляемый трехфазный генератор переменного тока.*

Математическая модель, газотурбинный двигатель, генератор переменного тока

**I.V. Lutsenko**

### **MATHEMATICAL MODEL OF AUXILIARY POWERPLANT OF AIRCRAFT**

*Mathematical model of auxiliary power plant of aircraft with gas turbine engine and controllable three-phases AC generator as main components is investigated.*

Mathematical model, gas turbine engine, AC generator

#### **Назначение и функциональная схема вспомогательных силовых установок**

Вспомогательные силовые установки (ВСУ) широко используются на современных летательных аппаратах. На самолетах они предназначены для воздушного запуска маршевых двигателей, подачи сжатого воздуха для системы кондиционирования салона, питания бортовой системы электроснабжения на земле и при отказе основной системы электроснабжения в полете.

Функциональная схема ВСУ изображена на рис. 1 и включает следующие компоненты: линейный электромагнитный преобразователь (ЛЭП) и дозатор топлива топливного агрегата; газотурбинный двигатель (ГТД) и датчик температуры газов; возбудитель, вращающийся выпрямитель и генератор, входящие в состав управляемого трехфазного генератора переменного тока (ГПТ).

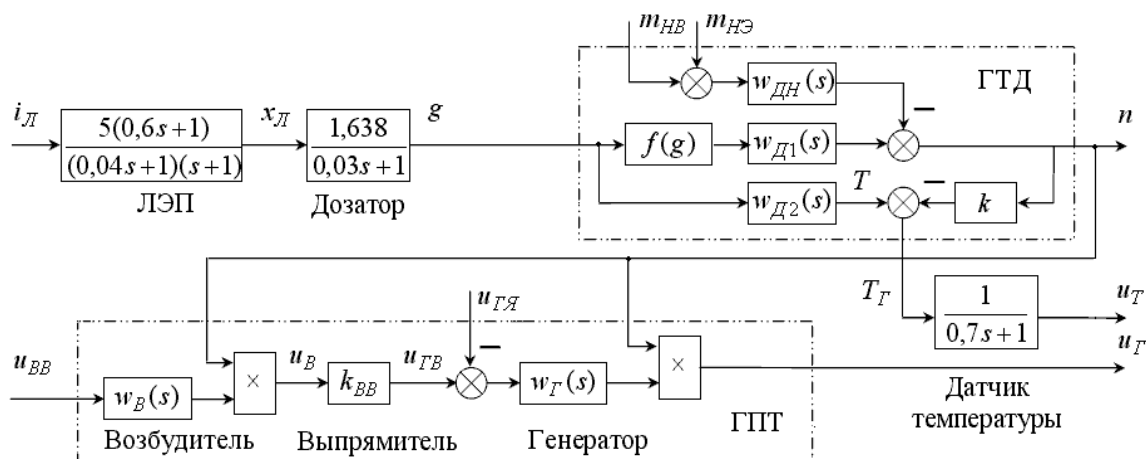


Рис. 1. Функциональная схема вспомогательной силовой установки самолета

Для ВСУ управляющими воздействиями являются: напряжение возбуждения  $u_{BB}$  индукторной обмотки возбуждителя ГПТ и управляющий ток  $i_L$  ЛЭП, который преобразуется в перемещение  $x_L$  иглы дозатора. От расхода топлива  $g$  на выходе дозатора зависят скорость вращения  $n$  вала ГТД и температура газов: в камере сгорания  $T$  и за турбиной  $T_G$ . При подаче напряжения возбуждения  $u_{BB}$  в якорной обмотке возбуждителя ГПТ создается переменное напряжение  $u_B$ , которое выпрямляется вращающимся выпрямителем и образует напряжение возбуждения  $u_{GB}$  генератора ГПТ. Следует отметить, что значение напряжения  $u_B$ , так же как и выходного фазного напряжения  $u_G$  генератора ГПТ, мультипликативно зависит от частоты вращения ротора ГПТ, т. е. скорости вращения вала ГТД.

На ВСУ действуют внешние возмущения, которыми являются воздушная и электрическая нагрузки. На ГТД они действуют в виде механических моментов сил  $m_{HB}$  и  $m_{HЭ}$ , приложенных к валу. Для ГПТ подключение электрической нагрузки приводит к возникновению напряжения  $u_{ГЯ}$  реакции якоря генератора, которое компенсируется увеличением якорного напряжения возбуждителя  $u_B$ . При этом значение разности напряжений возбуждения  $u_{GB}$  и реакции якоря  $u_{ГЯ}$  генератора ГПТ не изменяется и соответствует режиму холостого хода.

### Модель газотурбинного двигателя

Полная математическая модель ГТД является очень сложной, описывается большим числом нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений [1], ряд из которых представляются в виде графических зависимостей. Упрощенная, но достаточно адекватная модель ГТД применительно к реальному двигателю ТА 18-200 на основе экспериментально снятых кривых описано в [2, 3]. Используя полученные результаты, будем описывать приближенную модель ГТД в безразмерном виде следующими уравнениями:

$$\dot{n} = \frac{1}{J} k (f(g) - n) - \frac{1}{J} m_{HB} - \frac{1}{J} m_{HЭ}; \quad \dot{T} = \frac{1}{\tau_T} (k_T g - T); \quad T_G = T - k_n n. \quad (1)$$

Здесь введены обозначения относительных величин:

$$k_n = K_n \omega_{ном}, \quad (2)$$

(индекс *ном* обозначает номинальную величину), а также нелинейной функции  $f(g) = F(G/G_{ном})/\omega_{ном}$ , где  $\omega$  [рад/с<sup>-1</sup>] – угловая скорость вращения вала ( $\omega_{ном} = 2513$  рад/с<sup>-1</sup>);  $J' = 0,17$  [Н·м·с<sup>2</sup>] – момент инерции вращающихся частей на валу;  $M_0 = 12$  [Н·м] – пусковой момент стартера;  $G$  [кг/ч] – расход топлива ( $G_{ном} = 149,3$  кг/ч);  $m_{HB}$ ,  $m_{HЭ}$  [Н·м] – механические моменты воздушной и электрической нагрузок, соответственно ( $M_B = 6,85$  Н·м,

$M_{\dot{\gamma}} = 1,41 \text{ Н}\cdot\text{м}$ );  $T'$  [град] – температура газов в камере сгорания ( $T_{\max} = 1000 \text{ град}$ );  $K_n = 0,0003 \text{ [с]}$  – коэффициент, определяющий влияние скорости вращения вала двигателя (турбины) на температуру газов  $T_T$  за турбиной;  $K = 0,044 \text{ [Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с]}$ ,  $K_T = 7,37 \text{ [град/кг]}$  – параметры двигателя;  $F(G)$  – статическая характеристика двигателя;  $\tau_T = 3,5 \text{ [с]}$  – постоянная времени сгорания топлива.

Структурная схема приближенной модели ГТД приведена на рис. 2.

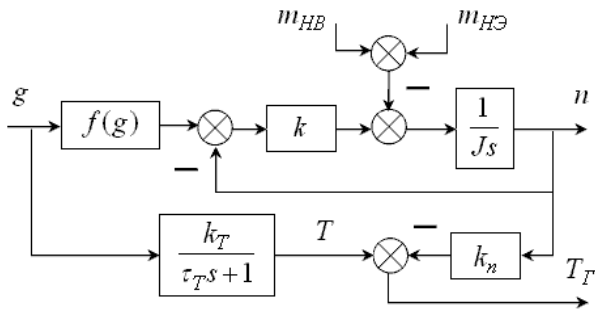


Рис. 2. Структурная схема приближенной модели ГТД

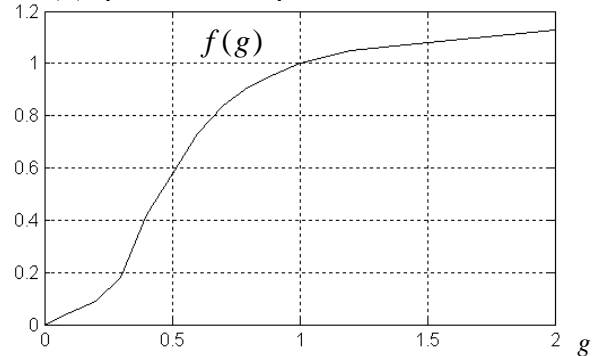


Рис. 3. Статическая характеристика ГТД

Вычисляя по соотношениям (2) значения параметров двигателя и моментов нагрузок, получим:  $J = 35 \text{ с}$ ,  $k = 9,18$ ,  $k_n = 0,78$ ,  $k_T = 1,1$ ,  $m_{HА} = 0,57$ ,  $m_{H\dot{\gamma}} = 0,12$ . Заменяем входящую в (1) нелинейную функцию  $f(g)$ , график которой приведен на рис. 3 [2], линейной функцией  $f(g) = \alpha \cdot g$ . Коэффициент  $\alpha = 0,36$  определим как тангенс угла наклона касательной к графику функции  $f(g)$  в точке, соответствующей номинальному режиму работы двигателя ( $g = 1$ ,  $n = 1$ ). Окончательно, используя соотношения (1), запишем уравнения модели ГТД в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{n} = 0,0944g - 0,2623n - 0,029m_{HВ} - 0,029m_{HЭ}; \\ \dot{T} = 0,3143g - 0,29T; \quad T_T = T - 0,78n. \end{cases} \quad (3)$$

Запишем известные [3] уравнения модели ЛЭП:

$$\dot{x}_Л = 75i_Л + 25x_1 - 26x_Л; \quad \dot{x}_1 = 5i_Л - x_Л; \quad (4)$$

а также моделей дозатора топлива и датчика температуры газов (термопары):

$$\dot{g} = 54,6x_Л - 33,33g; \quad (5)$$

$$\dot{T}_T = 1,429T - 0,9714n - 1,429u_T, \quad (6)$$

где  $x_1$  – вспомогательная переменная.

### Модель управляемого генератора переменного тока

Построение математической модели ГПТ будем осуществлять применительно к реальному индукторному генератору ГПТ-100. Как отмечалось выше, конструктивно электрическая машина состоит из трехфазного возбудителя, вращающегося трехфазного двухполупериодного диодного выпрямителя и трехфазного генератора. Используя теорию расчета индукторных машин [4], запишем в безразмерном виде уравнения выходного действующего напряжения одной из фаз генератора:

$$u_{\Gamma} = i_{\Gamma} W_{\Gamma} k_{\Gamma} \cdot P_{M\Gamma}(F_{\Gamma}) \cdot n; \quad \frac{L_{\Gamma}}{R_{\Gamma}} \frac{di_{\Gamma}}{dt} = u_{\Gamma B} - i_{\Gamma} - u_{\Gamma A}. \quad (7)$$

В уравнениях (7) используются обозначения относительных величин:

$$u_{\bar{A}} = \frac{U_{\bar{A}}}{U_{\bar{A}\bar{m}}}, i_{\Gamma} = \frac{I_{\Gamma}}{I_{\Gamma_{xx}}}, k_{\Gamma} = \frac{\sqrt{2}\pi W_{\Gamma H} \omega_{\text{ном}} I_{\Gamma_{xx}}}{U_{\Gamma_{\text{ном}}}}, u_{\Gamma B} = \frac{U_{\Gamma B}}{I_{\Gamma_{xx}} R_{\Gamma}}, u_{\Gamma \bar{A}} = \frac{I_{\Gamma \bar{A}} R_{\Gamma}}{I_{\Gamma_{xx}} R_{\Gamma}}, \quad (8)$$

а также индуктивности [Гн] якорной обмотки генератора

$$L_{\Gamma} = W_{\Gamma}^2 \cdot P_{M\Gamma}(F_{\Gamma}); \quad (9)$$

где  $U_{\Gamma}$  [В] – выходное действующее напряжение одной из фаз генератора ( $U_{\Gamma_{\text{ном}}} = 115$  В);  $I_{\bar{A}}$  и  $I_{\Gamma_{xx}}$  [А] – рабочий ток и ток холостого хода в якорной обмотке генератора, соответственно;  $W_{\Gamma} = 500$  – число витков в якорной обмотке;  $W_{\Gamma H} = 36$  – число витков в индукторной обмотке;  $k_{\bar{A}}$  [витки/Ом·с] – параметр генератора;  $P_{M\Gamma}(F_{\Gamma})$  [Вб/А·витки] – функция нелинейной зависимости магнитной проводимости магнитной цепи генератора от магнитной движущей силы (МДС)  $F_{\Gamma} = (I_{\Gamma} - I_{\Gamma \bar{A}}) W_{\Gamma}$  [А·витки];  $R_{\Gamma} = 2,6$  Ом – активное сопротивление якорной обмотки генератора;  $I_{\Gamma \bar{A}} = 2,7 W_{\Gamma H} / W_{\Gamma} \cdot I_H = 9,0$  [А] – приведенный средний ток реакции якоря генератора при возникновении в индукторной обмотке генератора тока нагрузки  $I_f = 46,4$  А. Постоянное напряжение возбуждения генератора  $U_{\Gamma B}$  [В] определим как

$$U_{\Gamma B} = k_{BB} \sqrt{3} U_B. \quad (10)$$

Здесь  $k_{BB} = 0,98$  – коэффициент передачи трехфазного двухполупериодного выпрямителя;  $U_B$  [В] – выходное амплитудное напряжение возбудителя.

Уравнения выходного амплитудного напряжения возбудителя ГПТ аналогичны уравнениям (7) - (9) и в безразмерном виде могут быть записаны следующим образом:

$$u_B = i_B W_{BH} k_B \cdot P_{MB}(F_B) \cdot n; \quad \frac{L_B}{R_B} \frac{di_B}{dt} = u_{BB} - i_B. \quad (11)$$

Здесь используются следующие обозначения относительных величин:

$$u_B = \frac{U_B}{I_{\Gamma_{xx}} R_{\Gamma}}, i_B = \frac{I_B}{I_{B_{xx}}}, k_B = \frac{2\pi W_B \omega_{\text{ном}} I_{B_{xx}}}{I_{\Gamma_{xx}} R_{\Gamma}}, u_{BB} = \frac{U_{BB}}{I_{B_{xx}} R_B}, \quad (12)$$

а также индуктивности [Гн] индукторной обмотки возбудителя

$$L_B = W_{BH}^2 \cdot P_{MB}(F_B); \quad (13)$$

где  $I_B$  и  $I_{B_{xx}}$  [А] – рабочий ток и ток холостого хода в индукторной обмотке возбудителя, соответственно;  $W_{BH} = 1488$  – число витков индукторной обмотки возбудителя;  $W_B = 136$  – число витков якорной обмотки возбудителя;  $k_B$  [витки/Ом·с] – параметр возбудителя;  $P_{MB}(F_B)$  [Вб/А·витки] – функция нелинейной зависимости магнитной проводимости магнитной цепи возбудителя от МДС  $F_B = I_B W_{BH}$  [А·витки];  $R_B = 2,9$  [Ом] – активное сопротивление индукторной обмотки возбудителя.

Следует отметить, что в уравнениях (11) не учитывается ток реакции индуктора возбудителя при возникновении тока  $I_{\bar{A}\beta}$ , поскольку его величина мала.

Используя экспериментальные данные (значения напряжений  $U_{BB}$ ,  $U_{\Gamma}$  и тока  $I_H$ ), полученные для различных статических режимов работы ГПТ, определены значения токов холостого хода в индукторной обмотке возбудителя  $I_{B_{xx}} = 0,67$  А и якорной обмотке генератора  $I_{\Gamma_{xx}} = 5,79$  А, параметры возбудителя  $k_B = 15212,5$  витки/Ом·с и генератора  $k_{\Gamma} = 3221,1$  витки/Ом·с, а также регулировочные характеристики намагничивания магнитопроводов возбудителя  $\Phi_B(i_B) = i_B W_{BH} k_B \cdot P_{MB}(F_B)$  и генератора  $\Phi_{\Gamma}(i_{\Gamma}) = i_{\Gamma} W_{\Gamma} k_{\Gamma} \cdot P_{M\Gamma}(F_{\Gamma})$ , графики которых приведены на рис. 4.

Введем в рассмотрение вспомогательные переменные:

$$e_B = \Phi_B(i_B) \quad \text{и} \quad e_{\Gamma} = \Phi_{\Gamma}(i_{\Gamma}), \quad (14)$$



с использованием которых представим структурную схему модели ГПТ в виде, изображенном на рис. 5.

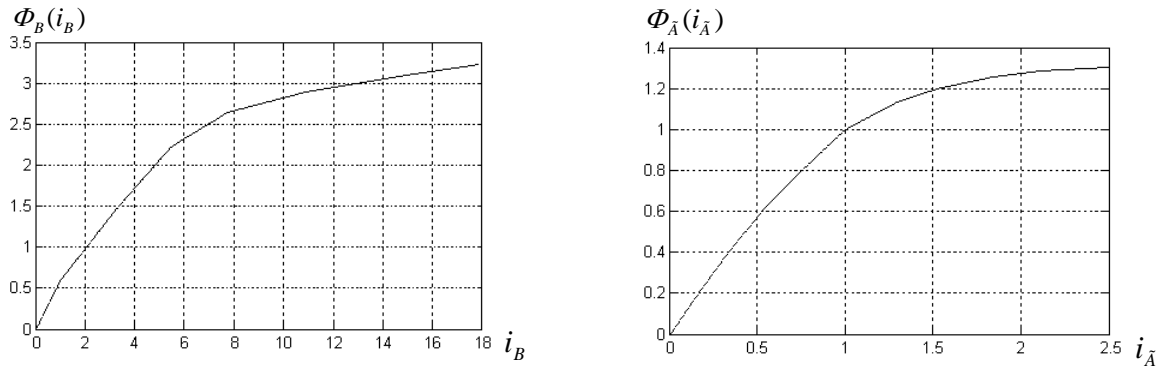


Рис. 4. Регулировочные характеристики намагничивания магнитопроводов ГПТ

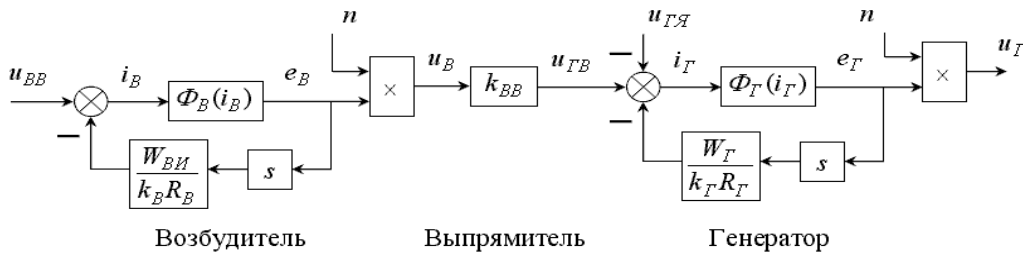


Рис. 5. Структурная схема приближенной модели ГПТ

Заменим нелинейные функции  $\Phi_B(i_B)$  и  $\Phi_G(i_G)$  линейными функциями  $\Phi_B(i_B) = \alpha_B \cdot i_B$  и  $\Phi_G(i_G) = \alpha_G \cdot i_G$ , где коэффициенты  $\alpha_B = 0,37$  и  $\alpha_G = 0,62$  определим как тангенсы углов наклона касательных к графикам соответствующих функций в рабочих точках для режима работы ГПТ при включенной нагрузке. Тогда уравнения (7), (11), используя выражения (9), (10), (13), (14) можно переписать следующим образом:

$$\begin{cases} u_G = e_G \cdot n; & \frac{W_G}{k_G R_G} \dot{e}_G = k_{BB} \sqrt{3} \cdot u_B - \frac{1}{\alpha_G} e_G - u_{ГЯ}; \\ u_B = e_B \cdot n; & \frac{W_{БИ}}{k_B R_B} \dot{e}_B = u_{BB} - \frac{1}{\alpha_B} e_B; \end{cases} \quad (15)$$

или, используя числовые значения параметров модели ГПТ, в виде

$$\begin{cases} u_G = e_G \cdot n; & \dot{e}_G = 28,475u_B - 27,02e_G - 16,75u_{ГЯ}; \\ u_B = e_B \cdot n; & \dot{e}_B = 29,65u_{BB} - 80,13e_B. \end{cases} \quad (16)$$

Разложим в ряд Тейлора выражения для  $u_B$  и  $u_A$ , не учитывая члены разложения второго и высших порядков:  $u_B = e_B + n$ ,  $u_G = e_G + n$ . Тогда, принимая во внимание первое уравнение из (3), система уравнений (13) может быть представлена в виде следующей системы линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{e}_B = 29,65u_{BB} - 80,13e_B; \\ \dot{e}_G = 28,475e_B - 27,02u_G + 55,233n + 0,0944g - 16,75u_{ГЯ} - 0,029m_B - 0,029m_D. \end{cases} \quad (17)$$

Таким образом, окончательно заключаем, что математическая модель вспомогательной силовой установки самолета может быть представлена системой линейных дифференциальных уравнений первого порядка, включающей уравнения газотурбинного двигателя (3),

линейного электромагнитного преобразователя (4), дозатора топлива (5), датчика температуры (6) и генератора переменного тока (17).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Теория автоматического управления силовыми установками летательных аппаратов. Управление ВРД / под ред. А.А. Шевякова. М.: Машиностроение, 1976. 344 с.
2. Приближенная модель газотурбинного двигателя в режиме разгона со стартером / О.В. Авдеев, В.Ю. Челмадеев, А.И. Голодный и др. // Проблемы точной механики и управления: сб. науч. трудов. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2004.
3. Луценко И.В. Синтез цифрового регулятора для контура ограничения температуры газов газотурбинного двигателя / И.В. Луценко // Доклады академии военных наук. 2005. №1. С. 47-53.
4. Альпер Н.Я. Индукторные генераторы / Н.Я. Альпер, А.А. Терзян. М.: Энергия, 1970.

**Луценко Илья Вячеславович** –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 004.8

**А.А. Большаков, В.П. Глазков, И.В. Егоров, А.В. Лавров**

#### **СОЗДАНИЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ДВИЖЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

*Описан метод динамической коррекции траектории манипулятора при высоких требованиях к точности и быстродействию системы на основе нейронной сети прямого распространения.*

Нейронная сеть, манипулятор, планирование траекторий, многомерная оптимизация

**A.A. Bolshakov, V.P. Glazkov, I.V. Egorov, A.V. Lavrov**

#### **CREATION MANIPULATOR MOVEMENT DYNAMIC CORRECTION METHOD BASED ON NEURAL NETWORKS**

*The article describes manipulator trajectory dynamics correction method for high accuracy and performance demand, based on neural network of direct distribution.*

Neural networks, manipulator, trajectory planning, multidimensional optimization

Проведенный анализ показывает, что, несмотря на относительно большое количество существующих методов, задача непрерывного динамического управления манипулятором остается весьма актуальной и сложной. Для ее решения предлагается использовать новый подход, позволяющий эффективно учитывать динамические свойства манипулятора и, следовательно, управлять им при высоких скоростях движения рабочего органа. Для этого предлагается при планировании траектории использовать искусственные нейронные сети (НС) прямого распространения. При этом появляется возможность учесть динамические свойства манипулятора, планировать траектории, близкие к оптимальным по ряду выбранных критериев: энергетические затраты, объем движения в кинематических парах, т.е. без лишних блуждающих движений, с предельно допустимыми скоростями и ускорениями и т.д.

Целью планирования траектории является определение непрерывных функций обобщенных координат (ОК) от времени, соответствующих траектории, которую манипулятор может отработать с ошибкой, не более допустимой. Исходными данными для построения программной траектории (ПТ) являются декартовы координаты, ориентация и скорость захватного устройства в узловых точках, число которых зависит от способа планирования траектории.

Различия в способах планирования условны, т.к. оно сводится к построению функций обобщенных координат по времени. Способы планирования отличаются подробностью задания пространственной траектории, т.е. числом узловых точек на ней. В случаях, когда существенным является начальное и конечное положение рабочего инструмента (РИ) манипулятора, а также отсутствие столкновения с препятствиями, а других ограничений на траекторию не накладывается, применяется планирование в обобщенных координатах. Название способа планирования отражает, что за исключением нескольких узловых точек, число которых может быть от двух до шести, декартовы координаты РИ в процессе движения не контролируются.

Уменьшения динамической ошибки в этом случае не требуется, т.к. скорость движения в начале траектории и при приближении к конечной точке малы, следовательно, мала и динамическая составляющая ошибки движения, на среднем участке траектории понятие динамической ошибки теряет смысл, т.к. траектория может быть произвольной. Поэтому динамическая коррекция требуется в тех случаях, когда требования к точности отработки траектории высоки и количество узловых точек измеряется десятками. Такой способ планирования принято называть планированием в декартовых координатах. В каждом узле траектории требуется обеспечить заданное положение и скорость РИ, а в промежутках между ними движение может быть произвольным при условии неразрывности производных по ОК и допустимом отклонении РИ от прямой, соединяющей узловые точки, т.е., закон управления соответствует выражению

$$q_i(t) = f(\mathbf{V}_j, \dot{\mathbf{V}}_j, \mathbf{V}_{j+1}, \dot{\mathbf{V}}_{j+1}t), \quad (1)$$

где  $q_i(t)$  – программный закон изменения  $i$ -й обобщенной координаты на  $j$ -м отрезке траектории, заданном  $j$ -й и  $j+1$ -й узловыми точками;  $\mathbf{V}_j, j = \overline{1, k}$  – векторы параметров узловых точек, размерностью  $6 \times 1$ , содержащие значения желаемых декартовых координат и ориентации РИ в узловых точках траектории;  $\dot{\mathbf{V}}_j$  – векторы желаемых скоростей РИ в узловых точках;  $t$  – время;  $f$  – некоторая функция, определение которой составляет задачу планирования ПТ.

Так как декартовы координаты РИ соответствуют ОК, то узловые точки целесообразно задать в обобщенных координатах (ОК), решением обратной задачи кинематики (ОЗК). Тогда выражение (1) запишется в виде

$$q_i(t) = f(q_{ij}, \dot{q}_{ij}, q_{ij+1}, \dot{q}_{ij+1}, t). \quad (2)$$

С учетом динамики манипулятора, взаимовлияния звеньев и отставания действительных значений ОК от их программных величин в процессе отработки траектории выражение (2) следует переписать в виде

$$u_{I\bar{B}i}(t) = f(\mathbf{q}_j, \dot{\mathbf{q}}_j, \mathbf{q}_{j+1}, \dot{\mathbf{q}}_{j+1}, t), \quad (3)$$

где  $u_{I\bar{B}i}(t)$  – закон управляющего воздействия по  $i$ -й ОК, соответствующий траектории, проходящей через заданные узловые точки на  $j$ -м отрезке;  $\mathbf{q}_j, \dot{\mathbf{q}}_j, j = \overline{1, k}$  – векторы значений желаемых обобщенных координат и скоростей по обобщенным координатам в узловых точках соответственно. Векторные аргументы в выражении (3) введены из-за зависимости динамических свойств манипулятора от его конфигурации и текущих значений скоростей по ОК, а следовательно, необходимости учитывать одновременно все ОК и скорости при вычислении управляющего воздействия для отдельной ОК.

При планировании ПТ закон изменения ОК наиболее часто аппроксимируется полиномами (сплайнами) третьего-пятого порядков, т.к. при этом обеспечиваются условия непрерывности производных ОК. Порядок полинома определяется количеством условий, накладываемых на траекторию в узловых точках. К ним относятся значения ОК и скоростей в начальной и конечной точках отрезка траектории. Таким образом, законы управления приводами манипулятора целесообразно искать в виде последовательности полиномов третьего порядка, коэффициенты которых вычисляются по значениям ОК и их производных в смежных узловых точках:

$$u_{I\bar{B}i}(t) = c_{3ij}t^3 + c_{2ij}t^2 + c_{1ij}t + c_{0ij}, \quad (4)$$

где  $u_{I\bar{B}i}$  – программный закон управления приводом  $i$ -й ОК на  $j$ -м участке траектории;  $c_{nij}, n = \overline{0, 3}$  – коэффициенты полинома;  $t$  – нормированное время, изменяющееся от 0 до 1 на каждом отрезке траектории.

Процедура формирования управляющего воздействия при планировании ПТ в декартовых координатах формулируется следующим образом:

1. Пусть задан набор узловых точек в базовой системе координат, через которые должен пройти РИ манипулятора.

2. Решением ОЗК для каждой узловой точки формируется соответствующий вектор ОК.

3. Для каждой пары полученной последовательности узловых точек в пространстве ОК формируется набор граничных условий, описывающих отрезок траектории и текущее состояние манипулятора, т.е.  $\mathbf{q}_j, \dot{\mathbf{q}}_j, \mathbf{q}_{j+1}, \dot{\mathbf{q}}_{j+1}$ .

4. Вычисляются коэффициенты  $c_{nij}$  полиномов третьего порядка, задающих управляющие воздействия по ОК  $u_{I\bar{B}i}$  между  $j$ -м и  $j+1$ -м узлами траектории. При этом отсутствует необходимость условия, чтобы действительный закон изменения ОК  $q_{oij}(t)$  при отработке управляющего воздействия  $u_{I\bar{B}i}(t)$ , всегда соответствовал полиномиальному закону. Такое возможно лишь в частных случаях, например, при малых скоростях движения. В общем случае, движение между узловыми точками будет осуществляться с отклонением от ПТ. Полученные управляющие воздействия должны обеспечивать выполнение заданных граничных условий. Кроме того, максимальное отклонение от прямой, соединяющей узловые точки в пространстве декартовых координат, не должно превышать допустимого значения.

Для вычисления коэффициентов в выражении (4) предлагается использовать многослойную НС прямого распространения. Структурная схема подсистемы динамической коррекции на основе НС изображена на рис. 1.

В состав подсистемы входят нейронная сеть, формирователь управляющих воздействий и датчики угловой скорости и углов поворота звеньев. На основе значений ОК и угловых скоростей в начальной и конечной точках текущего отрезка траектории НС формирует набор коэффициентов полиномов, аппроксимирующих законы изменения ОК в каждом сочленении.

Формирователь управляющих воздействий преобразует полученные с НС коэффициенты полиномов в непрерывные сигналы управления приводами звеньев.

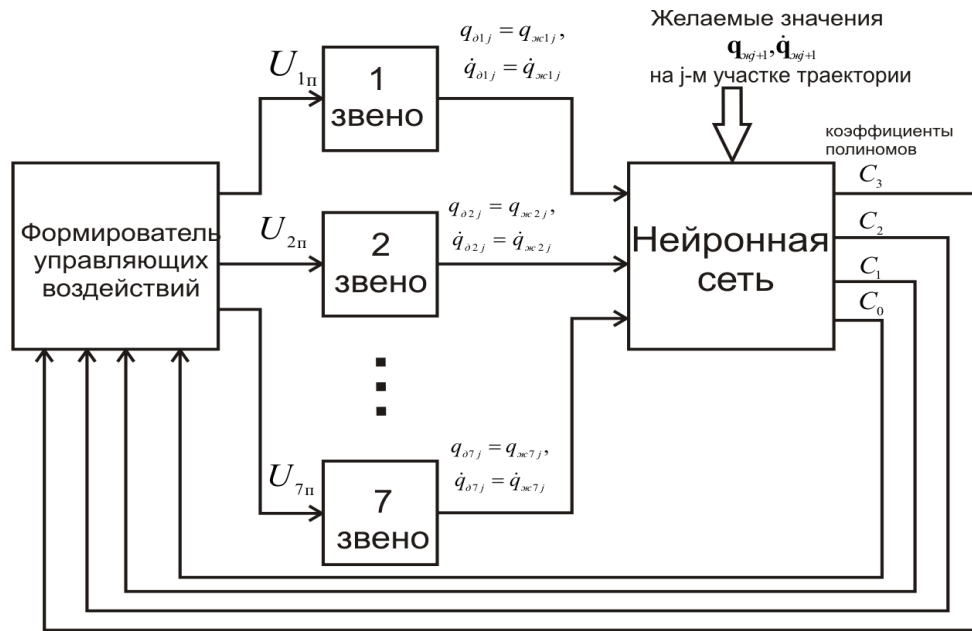


Рис. 1. Структурная схема подсистемы динамической коррекции

По завершении отработки текущего отрезка траектории действительные значения ОК и угловых скоростей в конечной точке отрезка принимаются в качестве желаемых значений в начальной точке последующего отрезка траектории. Вычисляются новые значения коэффициентов аппроксимирующих полиномов, и процесс повторяется, пока все узловые точки траектории не будут пройдены.

На рис. 1 обозначены:  $U_{in}$  – управляющее воздействие на входе  $i$ -го звена;  $q_{oi}, \dot{q}_{oi}$  – действительное значение ОК и скорости в начальной точке  $j$ -го участка траектории для  $i$ -го звена, соответственно;  $\mathbf{q}_{ожj}, \dot{\mathbf{q}}_{ожj}, \mathbf{q}_{ожj+1}, \dot{\mathbf{q}}_{ожj+1}$  – векторы желаемых значений ОК и скоростей в начальной и конечной точках  $j$ -го участка траектории, соответственно.

Структура НС изображена на рис. 2, в квадратные скобки заключены параметры, которые могут быть опущены, если не накладываются условия на скорость в конечной точке отрезка траектории.

На вход НС подается вектор, состоящий из значений  $\mathbf{q}_j, \dot{\mathbf{q}}_j, \mathbf{q}_{j+1}, \dot{\mathbf{q}}_{j+1}$ . С выхода НС снимаются значения коэффициентов полинома, определяющего управляющее воздействие  $u_{Пzi}$  на входе привода  $i$ -го сочленения манипулятора.

При управлении манипулятором определение требуемых значений скоростей по ОК  $\dot{\mathbf{q}}_j, \dot{\mathbf{q}}_{j+1}$  в узловых точках траектории, необходимое для вычисления коэффициентов полиномов может вызывать затруднения, во-первых, из-за многозначности решения ОЗК для кинематически избыточного манипулятора. Во-вторых, скорость РИ в пространстве декартовых координат может быть задана не во всех точках траектории, а только в начальной и конечной точках, где она равна или близка к нулю. В других узлах траектории требования к соблюдению заданной скорости движения могут отсутствовать. Поэтому представляется целесообразным при предварительном планировании траекторий, если не заданы скорости по ОК, в качестве граничного условия вместо скорости по ОК в конечной точке участка траектории использовать среднее арифметическое ОК в узловых точках. Скорость в начальной точке следующего участка траектории равна скорости в конечной точке предыдущего участка. Таким образом, в зависимости от требований к траектории могут потребоваться различные НС, обученные на разных обучающих множествах.

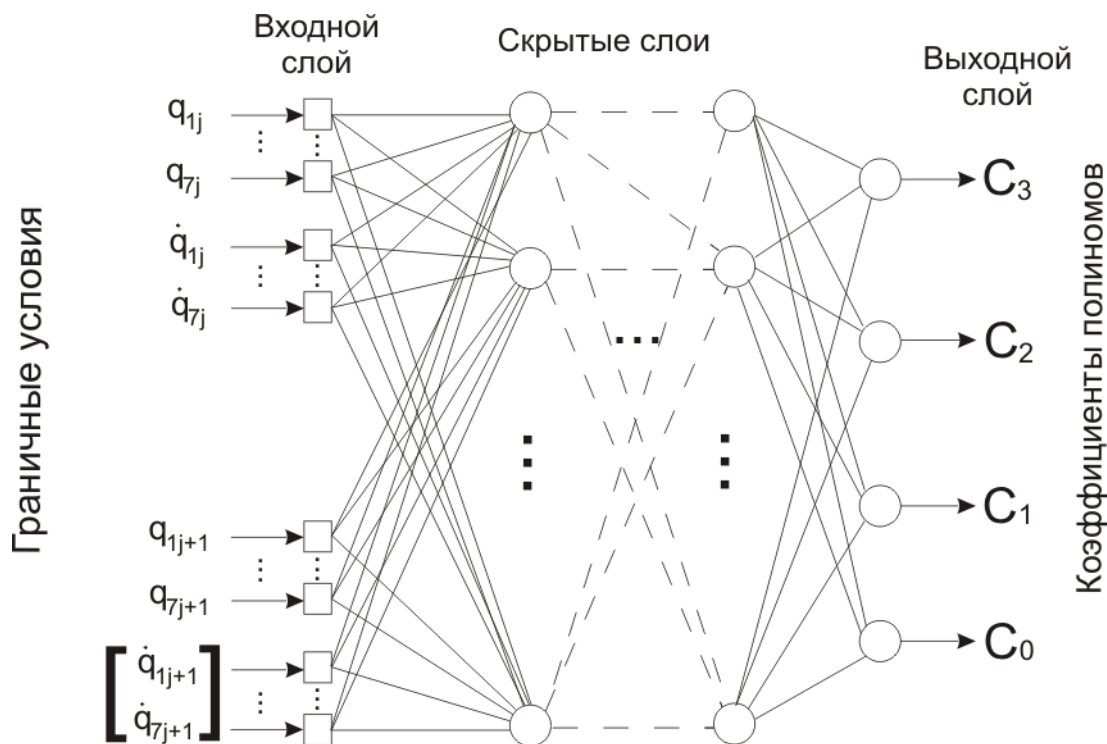


Рис. 2. Структура НС для вычисления коэффициентов полиномов, определяющих управляющее воздействие по  $i$ -й ОК для  $j$ -го участка траектории

Рассмотрим предлагаемый принцип корректировки динамической ошибки при помощи НС. Пусть имеется некоторая непрерывная скалярная или векторная функция векторного аргумента, описывающая реакцию некоторой системы на входное воздействие:

$$\mathbf{Y}_c = \varphi(\mathbf{X}), \tag{5}$$

где  $\mathbf{Y}_c$  – выходной вектор системы;  $\mathbf{X}$  – вектор входных значений. Для простоты, предположим, что размерности  $\mathbf{Y}_c$  и  $\mathbf{X}$  одинаковы. В качестве аксиомы примем возможность обученной НС достаточной сложности воспроизвести функцию (5) с некоторой точностью:

$$\mathbf{Y}_{НС} = \psi(\mathbf{X}),$$

где  $\mathbf{Y}_{НС}$  – выходной вектор НС. Подавая некоторое значение входного вектора  $\mathbf{X}$  на вход НС, на выходе получим выходное значение, близкое к тому, которое способна выдать система (5), т.е.  $\mathbf{Y}_{НС} \approx \mathbf{Y}_c$ . Способность воспроизводить функцию (5) приобретает НС в процессе обучения, для которого используется дискретное множество пар входных и выходных векторов, соответствующих друг другу:  $\{\mathbf{x} \leftrightarrow \mathbf{Y}_c\}$ . Благодаря способности НС к обобщению, подача на вход НС значений, не принадлежащих обучающему множеству, не приводит к значительному увеличению ошибки при условии, что входные значения находятся в допустимом диапазоне. Замена при обучении НС входных значений выходными приведет к тому, что НС будет вычислять функцию, обратную (5), т.е.  $\mathbf{X} = h(\mathbf{Y}_c)$ . Таким образом, применяя НС, можно находить значение неизвестной непрерывной функции, обратной известной, заданной дискретным множеством значений.

В процессе генерации обучающего множества на приводы манипулятора или модели, его заменяющей, подается набор управляющих воздействий, вида (4), соответствующих фрагментам траекторий, которые распределены по всему рабочему диапазону. Приводы манипулятора обрабатывают управляющие воздействия с некоторой динамической ошибкой, обусловленной отставанием действительной траектории от ПТ и совместным влиянием зве-

ньев друг на друга. Каждому набору коэффициентов полинома соответствует некоторый действительный закон изменения  $i$ -й ОК во времени. Значения ОК, а также скорость по ней в начальный и конечный момент времени фиксируются и формируется обучающее множество:

$$\{c_{nij} \leftrightarrow |q_j \quad \dot{q}_j \quad q_{j+1} \quad \dot{q}_{j+1}|\}.$$

В процессе генерации обучающего множества отсутствует необходимость решать ОЗД. Необходимые данные получаются на реальном манипуляторе или на модели, предназначенной для решения прямой задачи динамики, которая имеет однозначное решение, в том числе и для манипулятора с кинематической избыточностью.

После обучения НС будет способна находить коэффициенты полиномов, обеспечивающие при движении манипулятора выполнение граничных условий  $q_j, \dot{q}_j, q_{j+1}, \dot{q}_{j+1}$ ,  $j$ -го участка траектории, с учетом нелинейностей привода, динамики и взаимовлияния звеньев, т.е. корректировка динамической ошибки заключается не в ее исправлении в процессе функционирования системы, а в формировании такого управляющего воздействия, при котором максимальная ошибка не превышает допустимого значения.

Вопрос об оптимальной структуре НС для динамической корректировки ПТ в общем случае остается открытым. На основе экспериментальных данных можно сформулировать следующие рекомендации:

1. Для упрощения структуры нейронной сети для каждой обобщенной координаты и каждого коэффициента полинома следует использовать отдельную НС с одним выходным значением, что позволит значительно уменьшить количество связей в каждой из них и, следовательно, ускорить обучение и повысить точность. Количество НС, работающих параллельно, определяется как число сочленений в манипуляторе, умноженное на 4 (число коэффициентов полинома).

2. Размерность входного вектора НС равна 28 или 21 в зависимости от предъявления жестких требований к скоростям движения в узловых точках.

3. Наибольшее число нейронов в одном из скрытых слоев целесообразно выбрать в 5 - 10 раз большим числа входов НС. Число нейронов в других скрытых слоях может быть меньшим.

4. Количество скрытых слоев целесообразно принять равным от 3 до 6.

5. Количество выходных переменных равно 1, т. е. каждая НС предназначена для вычисления значения одного коэффициента.

6. Для достижения требуемой точности количество тренировочных примеров должно быть не менее чем в 7 - 10 раз больше числа связей в НС.

Заметим, что чем больше нейронов в НС, тем точнее сеть аппроксимирует требуемую зависимость, и тем больше требуется обучающих примеров и, соответственно, увеличивается время обучения. Поэтому выбор структуры сети является результатом компромисса между точностью решения и возможностями обучения НС.

Набор тренировочных и тестовых данных для обучения НС создается в процессе выполнения следующего алгоритма:

1. Задается набор координат узловых точек и ориентаций РИ в них, соответствующих различным траекториям в диапазоне их возможного изменения. Для начальных и конечных точек траектории принимаются нулевые скорости движения. При размещении узловых точек вдоль траектории, принимается во внимание, что время движения от одного узла к другому должно быть одинаковым.

2. Решается ОЗК, набор декартовых координат узловых точек и ориентаций РИ в них преобразовывается в набор ОК.

3. Полученные наборы ОК проверяются на корректность с точки зрения кинематических и динамических ограничений.

4. Предварительно планируются траектории на основе аппроксимации полиномами третьего порядка, проходящие через точки, полученные на этапах 2, 3, создается набор ко-

эффицентов полиномов для вычисления управляющих воздействий по каждой из ОК, для каждого участка траектории.

5. Управляющие воздействия, определяемые полиномами, найденными на этапе 4, подаются на приводы манипулятора (модели) и по действительным значениям ОК и скоростей по ним, в моменты, соответствующие прохождению узловых точек траектории, формируется набор граничных условий  $\mathbf{q}_j, \dot{\mathbf{q}}_j, \mathbf{q}_{j+1}, \dot{\mathbf{q}}_{j+1}$ .

6. Формируются обучающие множества  $\{c_{3ij}, c_{2ij}, c_{1ij}, c_{0ij}\}_n \leftrightarrow \{\mathbf{q}_{ij}, \dot{\mathbf{q}}_{ij}, \mathbf{q}_{ij+1}, \dot{\mathbf{q}}_{ij+1}\}_n$ , где  $\{c_{3ij}, c_{2ij}, c_{1ij}, c_{0ij}\}_n$  – множество коэффициентов полиномов, определяющих  $n$ -ю траекторию, для всех ОК и участков траектории;  $\{\mathbf{q}_{ij}, \dot{\mathbf{q}}_{ij}, \mathbf{q}_{ij+1}, \dot{\mathbf{q}}_{ij+1}\}_n$  – множество граничных условий для  $n$ -й траектории.

Полученные обучающие множества применяются для обучения НС.

Таким образом, для обучения НС прямого распространения используются методы многомерной оптимизации, например, модификации метода градиентного спуска или квазиньютоновские алгоритмы. Выбор того или иного метода определяется сложностью НС, объемом обучающей выборки, аппаратным обеспечением. Так, для сравнительно несложных НС с количеством связей в пределах 1000-5000 хорошие результаты показывает метод Левенберга – Маркара [1]. Этот быстрый метод, тем не менее, весьма требователен к объему оперативной памяти компьютера. Несколько худшей сходимостью обладает метод сопряженных направлений, однако требования к объему оперативной памяти у него значительно ниже. Генетические алгоритмы целесообразно использовать для обучения сложных нейронных сетей с большим количеством скрытых слоев и значительным объемом обучающей выборки. Скорость обучения сложной НС при помощи генетического алгоритма может оказаться значительно выше, чем при использовании других методов [2].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ющенко А.С. // Экстремальная робототехника : материалы IX науч.-техн. конф. / ЦНИИ РТК. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. С.54–59.
2. Вороновский, Г. К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский. Харьков: Основа, 1997. 110 с.

**Большаков Александр Афанасьевич** –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системотехника» Саратовского государственного технического университета

**Глазков Виктор Петрович** –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

**Егоров Игорь Владимирович** –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

**Лавров Александр Владимирович** –

аспирант кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*



УДК 621.314

**Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский, М.В. Радионова****УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА  
ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ «SMART GRID»**

*Рассмотрено управление структурой преобразовательного комплекса, обеспечивающего оптимальное взаимодействие электрической нагрузки с питающей сетью в рамках технологии Smart Grid. Представлены две стратегии управления на базе искусственных нейронных сетей. Приведены результаты моделирования при изменении структуры комплекса.*

Преобразовательный комплекс, инвертор тока, конденсаторная батарея, перцептрон, нечеткая нейронная сеть

**E.E. Mirgorodskaya, N.P. Mityashin, Y.B. Tomashevskiy, M.V. Radionova****CONTROL OF STRUCTURE OF THE POWER CONVERTING COMPLEX  
AT TECHNOLOGY REALIZATION «SMART GRID»**

*Control of structure of the power converting complex providing optimum interaction of electric loading with a power line within the limits of technology Smart Grid is considered. Two strategy of control on the basis of artificial neural networks are presented. Results of modeling are resulted at alteration of structure of a complex.*

Power converting complex, current inverter, capacity module, perceptron, fuzzy neural network

Технология Smart Grid («Умные сети») представляет развитие идей и технологий энергосбережения, энергоэффективности, альтернативных источников энергии на основе повышения интеллектуального уровня всей сети [1]. Современные силовые преобразовательные комплексы (ПК) являются основой для оптимального взаимодействия питающей сети и нагрузки. По сути, это третий активный субъект «умной» сети, позволяющий создавать адаптивную сетевую инфраструктуру. В частности, в условиях нестабильности напряжения питающей сети и изменения нагрузки в широких пределах ПК осуществляет стабилизацию выходного напряжения.

Отметим две характерные особенности современных ПК. Первая заключается в том, что с переходом систем силовой электроники на блочно-модульный принцип построения появляется возможность повышения эффективности ПК за счет их структурной гибкости. Под этим понимается придание комплексам новых полезных свойств изменением структуры на базе имеющегося состава модулей, либо с минимальным привлечением дополнительного оборудования. Вторая связана с реализацией управляющих стратегий. Чтобы время реакции системы было соизмеримо с текущим процессом, необходима разработка специальных алгоритмов обработки информации, основанных на методах искусственного интеллекта (искусственные нейронные сети, нечеткие системы вывода и др.). Таким образом, ускорение алго-

ритмов осуществляется на основе повышения уровня интеллектуализации системы, что органично связывает это направление исследований с технологией «Smart grid».

При реализации ПК относительно часто используют структуру с явным звеном постоянного напряжения и инвертором тока в выходном звене. В [2, 3] показано, что эта структура обладает гибкостью, и приведены примеры построения адаптивных систем электроснабжения на ее основе. Использование подобных ПК в технологии «Smart grid» требует дальнейшего их развития, как в плане схемотехники, так и алгоритмов управления, что определило цель этой статьи.

Структурная схема разработанного ПК представлена на рис. 1 [4] и содержит преобразователь частоты с явным звеном постоянного тока, основным звеном которого является инвертор тока (ИТ) с многосекционной конденсаторной батареей (КБ) коммутирующих конденсаторов, которая состоит из  $N+1$  секций: основной и  $N$  дополнительных, подключаемых коммутаторами при увеличении и изменении характера нагрузки параллельно основной. Управление коммутаторами осуществляется системой управления (СУ), на вход которой поступают показания о величине выходного напряжения  $\bar{U}_H$  комплекса и величине тока  $\bar{I}_H$  нагрузки, снимаемые с датчиков напряжения и датчиков тока соответственно.

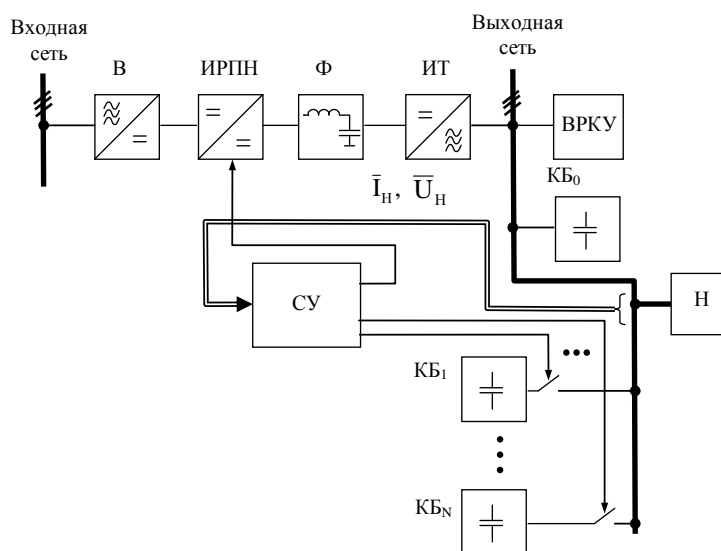


Рис. 1. Структурная схема ПК:

В – выпрямитель; ИРПН – импульсный регулятор постоянного напряжения; Ф – фильтр; ИТ – инвертор тока; СУ – система управления; Н – нагрузка; КБ – конденсаторная батарея

Стабилизация выходного напряжения в периоды постоянства структуры осуществляется с помощью импульсного регулятора постоянного напряжения (ИРПН).

На величину выходного напряжения существенно влияет изменение в широких пределах коэффициента передачи ИТ по напряжению в соответствии с изменением нагрузки, причиной которого является некомпенсированная часть реактивной мощности КБ. Для решения этой проблемы к выходу инвертора обычно подключают вентильно-реакторное компенсирующее устройство (ВРКУ). Основным недостатком их использования является то, что одновременно с компенсацией избыточной реактивной мощности ВРКУ, потребляя несинусоидальный ток от инвертора, ухудшает качество кривой выходного напряжения. Кроме того, использование компенсатора приводит к дополнительным потерям мощности при прохождении значительных токов через реакторы компенсатора.

Секционирование КБ позволяет выбрать модуль ВРКУ минимальной установленной мощности, сведя тем самым к минимуму негативные последствия указанных тенденций. Выбор мощности ВРКУ определяется величиной  $КБ_0$ , которая, в свою очередь, является резуль-

татом решения задачи оптимизации шага секционирования КБ в зависимости от процессов изменения нагрузки.

В рамках отдельной ступени с целью улучшения качества кривой выходного напряжения используются сложно-мостовые ИТ с многоэлементной КБ, обеспечивающие уничтожение в кривой выходного напряжения преобразователя нежелательных гармоник. Остальные секции КБ<sub>1</sub>...КБ<sub>N</sub> подключаются параллельно основной при изменении нагрузки, оставляя качество кривой выходного напряжения в тех пределах, которые обеспечиваются схемотехническим решением основной ступени ИТ+КБ<sub>0</sub>+ВРКУ.

Таким образом, величина реактивной мощности КБ является функцией величины нагрузки, что при ступенчатом управлении обеспечивает приемлемую величину избыточной реактивной мощности, исключая изменение коэффициента передачи ИТ по напряжению в широких пределах.

Для управления структурой ПК построим искусственную нейронную сеть (ИНС). Например, с поставленной задачей успешно справляется однослойный персептрон [5] с двумя входами и  $N$  выходами. На входы сети поступают соответственно значение выходного напряжения  $\bar{U}_H$  и значение тока нагрузки  $\bar{I}_H$ . В этом случае ИНС используется для определения состояния КБ, адекватного нагрузке. При этом каждому состоянию  $S_k$ , где для однотипных секций  $k = 1, \dots, N$ , соответствует некоторая область  $\hat{S}_k$  в прямоугольнике  $[z_{\min}, z_{\max}] \times [\cos \varphi_{\min}, \cos \varphi_{\max}]$ . Здесь  $z_{\min}, z_{\max}$  – минимальное и максимальное значения сопротивления нагрузки соответственно, а  $\cos \varphi_{\min}, \cos \varphi_{\max}$  –  $\cos \varphi$  нагрузки, соответствующий минимальному и максимальному углу сдвига фаз  $\varphi$  между током и напряжением.

При этом необходимо предпринимать меры по исключению автоколебаний структуры КБ при нахождении вектора с координатами  $z, \cos \varphi$  на границе между двумя или несколькими областями  $\hat{S}_k$ . На рис. 2 представлена схема персептрона, в которой новыми элементами, введенными для этой цели, являются триггер памяти текущего состояния (ТгП), блок порогового значения  $\varepsilon$  (БПЗ  $\varepsilon$ ) и блока выбора максимума (БВМ). БПЗ  $\varepsilon$  увеличивает пороги невозбужденных нейронов на положительное значение  $\varepsilon$ , что позволяет сохранять текущее состояние до тех пор, пока входной сигнал, соответствующий новому состоянию, не превысит один из этих порогов.

Этот прием аналогичен характеристике типа гистерезис для системы с двумя состояниями. Введение новых элементов предотвращает появление резких «всплесков», то есть изменения структуры объекта при однократном нахождении вектора входных переменных на границе между несколькими областями распознавания.

Нейронная сеть, распознавая область в пространстве параметров, определяет состояние управляемых ключей, изменяя, таким образом, емкость коммутирующих конденсаторов, при этом стабилизация напряжения при нестабильности питающей сети осуществляется традиционными методами с использованием ИРПН.

Объединить два контура управления представляется возможным при использовании системы нейронечеткого вывода [6]. Нечеткие нейронные сети или гибридные сети по замыслу их разработчиков призваны объединить достоинства нейронных сетей и систем нечеткого вывода. С одной стороны, они позволяют разрабатывать и представлять модели систем в форме правил нечетких продукций, которые обладают наглядностью и простотой содержательной интерпретации. С другой стороны, для построения правил нечетких продукций используются методы нейронных сетей, что является более удобным и менее трудоемким процессом для разработчиков.

На входы гибридной сети поступают отклонение выходного напряжения от номинального значения  $\bar{U}_H - \bar{U}_0$  и значение тока нагрузки  $\bar{I}_H$ .

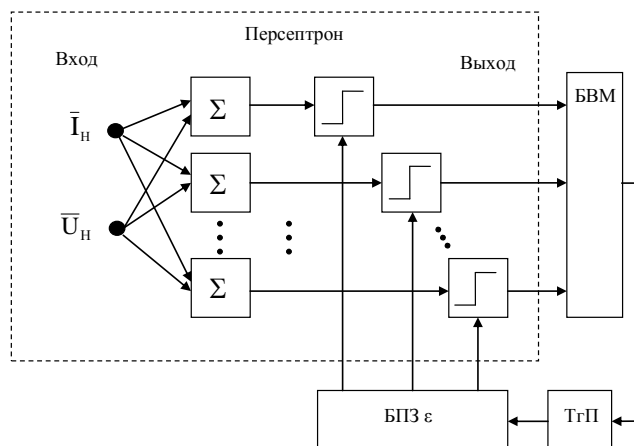


Рис. 2. Однослойный персептрон для управления структурой КБ

Нейронная сеть, распознавая область в пространстве параметров, определяет состояния импульсного преобразователя постоянного тока и управляемых ключей, изменяя соответствующим образом емкость коммутирующих конденсаторов и стабилизируя напряжение при нестабильности питающей сети. При разбиении области изменения каждой из переменных, например, на три интервала, потребуется введение девяти классов распознавания нейронной сети – подобластей изменения входных переменных и соответствующего числа правил управления ИРПН и ключами.

Разработанная схема преобразователя и алгоритм нейронечеткого управления исследованы на компьютерных моделях. На рис. 3 представлены результаты компьютерного моделирования процесса изменения трехфазной системы напряжений ИТ в процессе отключения 20% емкости КБ. Для представления используется следующая функция напряжений трехфазной системы:  $\Phi(t) = u_A^2(t) + u_B^2(t) + u_C^2(t)$ , где  $u_A(t)$ ,  $u_B(t)$ ,  $u_C(t)$  – фазные напряжения.

Для идеальной трехфазной системы она представляет собой константу, а в полярных координатах за период – окружность. Для выходной системы напряжений трехфазного ИТ в симметричном режиме период представляется симметричной кривой, показанной, например, на рис. 3 а. Из графиков следует, что переходный процесс затухает за несколько периодов при незначительном искажении выходного напряжения.

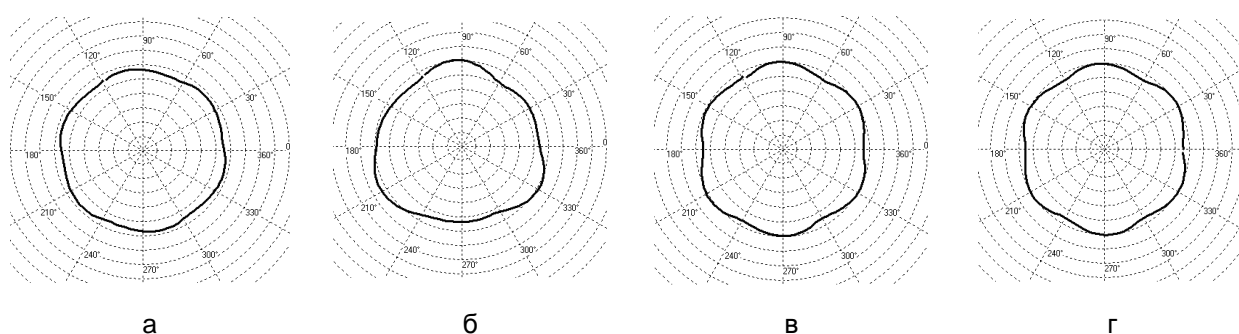


Рис. 3. Изменение трехфазной системы напряжений ИТ в процессе сброса 20% емкости КБ: а) система за период до отключения; б) первый период после отключения; в) второй период после отключения; г) 15-й период после коммутации (новое установившееся состояние)

Дальнейшие исследования показали, что в диапазоне нагрузки от номинальной до десятикратной разгрузки обеспечивается не более чем 5-7 % отклонение напряжения от номинального значения. Полученные результаты позволяют считать целесообразным применение ПК для оптимального взаимодействия нагрузок с питающей сетью в рамках технологии Smart Grid.

### Выводы

1. Современные силовые ПК необходимы в технологии Smart Grid как третий активный субъект «умной» сети, позволяющий создавать адаптивную сетевую инфраструктуру. Например, в условиях нестабильности напряжения питающей сети и изменения нагрузки в широких пределах ПК осуществляет стабилизацию выходного напряжения.

2. Разработан ПК, содержащий выпрямитель, импульсный регулятор постоянного напряжения, фильтр, а также инвертор тока с многосекционной КБ коммутирующих конденсаторов. Ступенчатое изменение емкости КБ обеспечивает приемлемую величину избыточной реактивной мощности, исключая изменение коэффициента передачи инвертора тока по напряжению в широких пределах.

3. Описаны две стратегии управления ПК на базе искусственных нейронных сетей. Для реализации первой использован персептрон, для которого разработаны меры по исключению автоколебаний структуры ПК. Вторая стратегия реализована с помощью нейронечеткого управления.

4. Приведенные результаты моделирования режимов работы ПК позволяют рекомендовать его для организации оптимального взаимодействия нагрузок с питающей сетью в рамках технологии Smart Grid.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кобец Б.Б. Возможные подходы к развитию концепции Smart Grid в России / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова // Энергетическая политика. 2010. №2. С. 34-42.
2. Митяшин Н.П. Гибкие преобразовательные комплексы / Н.П. Митяшин, Ю.Б.Томашевский. Саратов: СГТУ, 2002. 128 с.
3. Томашевский Ю.Б. Системный анализ адаптивных электротехнических комплексов / Ю.Б. Томашевский, Н.П. Митяшин. Саратов: СГТУ, 2006. 132 с.
4. Патент РФ на полезную модель № 98079. Преобразователь частоты на базе инвертора тока с изменяемой структурой конденсаторной батареи / Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский, Е.Е. Миргородская, М.В. Радионова. Опубл. 27.09.10. Бюл. №27
5. Уоссерман Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика / Ф. Уоссерман. М.: Мир, 1992. 256 с.
6. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.

**Миргородская Екатерина Евгеньевна** –

аспирантка кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета

**Митяшин Никита Петрович** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета

**Томашевский Юрий Болеславович** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета

**Радионова Мария Валентиновна** –

аспирантка кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 681.3

**М.Ф. Степанов, А.М. Степанов**

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ САМООРГАНИЗУЮЩАЯСЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ  
С ВЫЧИСЛИТЕЛЕМ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОСНОВЕ  
АВТОМАТИЧЕСКИ КОНСТРУИРУЕМОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

*Рассматриваются вопросы управления сложным нестационарным объектом в изменяющихся условиях. Предлагается подход к решению проблемы на основе использования интеллектуальных самоорганизующихся систем автоматического управления. Реализация закона управления осуществляется с помощью конструируемой искусственной нейронной сети.*

Интеллектуальные самоорганизующиеся системы автоматического управления, конструируемая искусственная нейронная сеть

**M.F. Stepanov, A.M. Stepanov**

**INTELLECTUAL SELF-ORGANIZING CONTROL SYSTEM WITH CONTROLLER  
ON THE AUTOMATICALLY DESIGNED NEURAL NETWORK**

*Questions of control by difficult nonstationary plant in changing environments are considered. The approach to the decision of a problem is offered on the basis of use of intellectual self-organizing control systems. Realization of the law of control is carried out on the automatically designed artificial neural network.*

Intelligent self-organizing systems of automatic control, automatically designed artificial neural network

Возрастающее усложнение объектов управления в сочетании с ужесточением требований к точности и качеству управления привели к противоречию с традиционными подходами к построению систем управления. Одним из путей решения указанной проблемы является использование интеллектуальных самоорганизующихся систем автоматического управления (ИССАУ) [1].

Важнейшим компонентом интеллектуальных самоорганизующихся систем управления является интеллектуальная система синтеза закона управления.

В качестве одного из путей решения указанной проблемы предлагается композиция концепции интеллектуальных самоорганизующихся систем автоматического управления и методов нейроуправления: 1) синтез закона управления с использованием средств ИССАУ; 2) реализация синтезированного закона управления с использованием ИНС.

Указанный подход можно проиллюстрировать рис. 1. Для компактности здесь рассматривается лишь задача стабилизации. Для задач слежения дополнительно требуется построение регулятора прямой связи, конструируемого похожим способом. В связи с тем, что процесс самоорганизации является итерационным, в схему включен стабилизирующий регулятор, параметры которого  $u_s = f_s(y)$  определяются на основе априорной информации. Эмулятор объекта управления выполняет функцию идентификации модели объекта управления и может быть реализован различными средствами, включая и нейроэмулятор [2].

Реализация синтезированного закона управления  $u_n = f_n(y)$  в виде искусственной нейронной сети (нейроконтроллера на рис. 1) может осуществляться: 1) обучением ИНС; 2) автоматическим конструированием ИНС [3]. Первый подход связан с большими затратами времени на обучение нейронной сети и поэтому в данном случае не может быть применен.

Процесс настройки параметров нейроконтроллера потребует определенного времени. Поэтому предлагается схема нейроконтроллера, представленная на рис. 2. В состав нейроконтроллера входят две конструируемые ИНС, работающие попеременно и блок настройки. В каждый момент времени работает только одна ИНС, реализующая текущий закон управления. Блок настройки ИНС осуществляет настройку параметров неактивной в данный момент времени ИНС (1 или 2). После окончания настройки параметров ИНС осуществляется переключение неактивной ИНС и активной ИНС.

Предлагаемый подход предполагает распараллеливание процессов управления, идентификации (настройки эмулятора), синтеза закона управления и, наконец, настройки нейроконтроллера в соответствии с параметрами нового закона управления. В связи с этим предлагается обобщенная схема реализации ИССАУ в виде совокупности вычислителя на микропроцессоре и блоков, построенных на ПЛИС, в которых реализуются эмулятор объекта управления и нейроконтроллер.

Рассмотрим задачу стабилизации нестационарного объекта. Пусть объект управления в номинальном режиме работы описывается в пространстве состояний уравнениями вида

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, \\ y = Cx, \end{cases}$$

$$A = \begin{pmatrix} -0.9964 & -3.762 & -0.5982 & -1.229 \\ 8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 1.73 & 0.1331 & 0.1146 & 0.02268 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

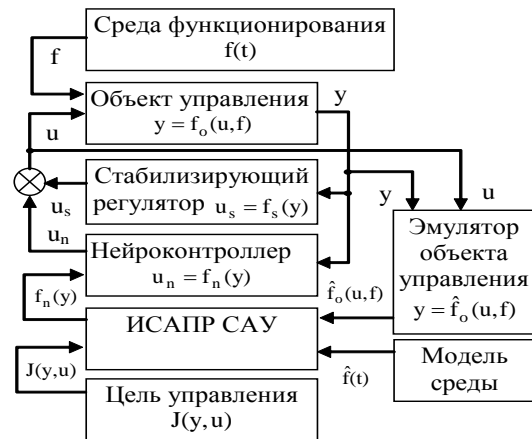


Рис. 1. Схема ИССАУ с нейроконтроллером



Рис. 2. Схема нейроконтроллера

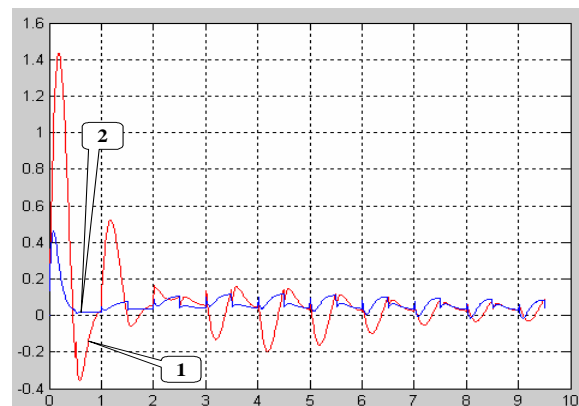


Рис. 3. Переходные процессы в системе управления многорежимным объектом: 1 – со стабилизирующим регулятором; 2 – со стабилизирующим регулятором и нейроконтроллером

где  $x \in R^4$  – вектор состояний объекта управления;  $u$  – управляющее воздействие;  $y \in R^4$  – вектор измеряемых переменных.

Требования к системе:  $y_1^* \leq 0.15$ . В дополнение к номинальному режиму работы объекта существуют ещё два режима. При этом объект управления сохраняет все основные свойства во всех режимах (управляемость, устойчивость). Переход из одного режима в другой осуществляется скачкообразно с периодом равным 1 с. Рассмотрим два варианта управления указанным объектом в соответствии со схемой, представленной на рис. 1. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

Проведенные исследования продемонстрировали работоспособность предлагаемого подхода в условиях наличия нестационарности объекта управления, когда стабилизирующий регулятор не обеспечивает выполнения заданных требований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов М.Ф. Интеллектуальные самоорганизующиеся системы автоматического управления / М.Ф. Степанов. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2002.
2. Омату С. Нейроуправление и его приложения. Кн. 2. / Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсоф; пер. с англ. Н.В. Батина; под ред. А.И.Галушкина, В.А.Птичкина. М.: ИПРЖР, 2000. 272 с.: (Нейрокомпьютеры и их применение).
3. О нейроуправлении с помощью конструируемой нейронной сети / М.Ф. Степанов, К.А. Кулаков, П.Н. Глазков и др. // Кибернетика и высокие технологии XXI века – С&Т-2008: сб. трудов IX Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. Т.1. Воронеж: НПФ «Саквее», 2008. С. 77 – 79.

**Степанов Михаил Федорович** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Степанов Андрей Михайлович** –

аспирант кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 553.981

**О.Н. Медведева, В.О. Фролов**

### СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

*Сжиженный природный газ является экологически чистым и безопасным видом топлива, что открывает широкие перспективы его использования в промышленности, на транспорте и в ЖКХ. Развитие отрасли производства СПГ для обеспечения внутреннего потребления, а также для экспорта за границу становится актуальным в связи с ростом цен на энергоносители и ростом энергопотребления. Приводятся результаты технико-экономических исследований газораспределительных систем на базе сжиженного природного газа.*

Природный газ, сжиженный природный газ, эффективность



O.N. Medvedeva, V.O. Frolov

**COMPARISON OF OPTIONS FOR SYSTEMS OF GAS SUPPLY TO CONSUMERS**

*Liquefied natural gas is environmentally clean and safe fuel that opens up broad prospects for its use in industry, transportation, housing and utilities. Development of industry LNG for domestic consumption, as well as for export abroad becomes relevant due to rising energy prices and rising energy consumption. The article presents the results of feasibility studies of gas distribution systems based on LNG.*

Natural gas, liquefied natural gas, efficiency

**Введение**

Природный газ является для России не только эффективным энергоресурсом, но и важным средством решения многих экономических и социальных проблем. Сдерживающим фактором для организации экспорта российского газа в другие страны являются транспортные проблемы. Необходимость строительства протяженных магистральных газопроводов по труднопроходимым и малоосвоенным территориям требует решения финансовых, экономических и технических задач. Поэтому вполне обоснованной является необходимость создания системы альтернативного трубопровода варианта транспортировки природного газа в сжиженном виде.

В последние годы потребители северо-западных регионов России все более акцентируют внимание на выгодах применения для отопления и бытовых нужд сжиженного природного газа (СПГ). В первую очередь, это обусловливается тем, что большинство вновь строящихся объектов расположено на значительном удалении от магистральных сетей природного газа. Существующие цены на электрическую энергию не решают проблемы эффективного энергоснабжения данных объектов, а использование мазута и угля с экологической точки зрения является наименее перспективным. Помимо этого, сжиженный природный газ – экологически чистый и безопасный из массово используемых видов топлива, а это открывает широкие перспективы его использования в промышленности, на транспорте и в ЖКХ. Как показывает зарубежный опыт, СПГ может успешно использоваться для регулирования пиковой неравномерности газопотребления на крупных промышленных объектах и в качестве моторного топлива (октановое число метана примерно в 1,15 раз выше, чем у бензина) [1].

Сжиженный метан является альтернативным видом топлива для регионов с небольшой плотностью населения и отсутствием в них сетевого газоснабжения в связи с необходимостью сооружения капиталоемких газопроводов большой протяженности (что экономически неоправданно). От комплекса по сжижению до потребителя газ доставляется различным транспортом, проходит стадию регазификации с редуцированием до требуемого давления и поступает в газообразном состоянии по обычным сетям газопроводов (внутригородских или внутрипоселковых) различным категориям потребителей.

В состав комплексов СПГ входят: комплексы по сжижению природного газа, хранилища и средства выдачи сжиженного газа, средства для транспортировки СПГ, хранилища газа у потребителей, газификаторы, криогенная арматура, оборудование газораспределения. Вопросы, связанные с оптимальным размещением завода по сжижению природного газа, актуальны, но мало проработаны теоретически и практически. Для оптимального функционирования всего комплекса СПГ необходимо наладить четкое взаимодействие между его основными составляющими [2].

**Выявление зон конкурентоспособного применения СПГ**

Для выявления зон конкурентоспособного применения сжиженного природного газа по сравнению с сетевым природным газом были проведены соответствующие исследования.

Сравнение вариантов проектных решений проводим по интегральным затратам:

$$Z_{\text{СПГ(ПГ)}} = K_{\text{СПГ(ПГ)}} + Y_{t_{\text{сл}}} \cdot I_{\text{СПГ(ПГ)}}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{СПГ(ПГ)}}$  – капитальные вложения в систему газоснабжения объекта СПГ и природным газом, руб.,  $I_{\text{СПГ(ПГ)}}$  – годовые эксплуатационные расходы по системе снабжения СПГ и природным газом, руб./год,  $Y_{t_{\text{сл}}}$  – дисконтирующий множитель, определяемый по формуле:

$$Y_{t_{\text{сл}}} = \sum_1^{t_{\text{сл}}} \frac{1}{(1+E)^t} = \frac{(1+E)^{t_{\text{сл}}} - 1}{(1+E)^{t_{\text{сл}}} \cdot E}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{сл}}$  – срок службы системы, лет;  $E$  – норма дисконта; 1/год.

Оптимальному варианту соответствует минимум целевой функции (1).

В варианте снабжения СПГ рассматривалась следующая схема: завод по производству СПГ (расположенный вблизи магистрального газопровода) – доставка сжиженного газа потребителю автотранспортом. Потребители расположены на расстоянии от 10 до 200 км от источника. В расчетах было принято, что газ равномерно распределяется между потребителями, суммарное газопотребление на базе СПГ варьируется от 1 до 30 т/год.

Капитальные затраты по варианту снабжения СПГ:

$$K_{\text{СПГ}} = K_{\text{зав}} + K_{\text{а.тр}} + K_{\text{хр}} + K_{\text{исп}}, \quad (3)$$

где  $K_{\text{зав}}$  – капитальные затраты в завод по производству СПГ;  $K_{\text{а.тр}}$  – капитальные вложения в транспорт газа;  $K_{\text{хр}}$  – капитальные вложения в хранилища;  $K_{\text{исп}}$  – капитальные вложения в испарители (газификаторы).

В варианте снабжения природным газом газоснабжение осуществляется по газопроводу-отводу. Природный газ под высоким давлением подается на газораспределительную станцию (ГРС), где редуцируется до низкого давления и поступает в распределительную сеть населенного пункта.

Капитальные затраты в систему снабжения сетевым природным газом определяются по формуле

$$K_{\text{ПГ}} = K_{\text{рг}} + K_{\text{грп}}, \quad (4)$$

где  $K_{\text{рг}}$  – капитальные вложения в распределительные газопроводы;  $K_{\text{грп}}$  – капитальные вложения в ГРП.

В табл. 1 приводятся результаты сравнительных расчетов.

Таблица 1

К выбору целесообразности применения вариантов газоснабжения

Производительность завода	Расстояние до потребителя, км
1 т в год	1445
10 т в год	649
20 т в год	1031
25 т в год	1190
30 т в год	1612

Как показывают расчеты, величина затрат на транспорт СПГ в весьма малой степени по сравнению с прочими показателями влияет на суммарную величину интегральных затрат. В свою очередь, затраты в систему снабжения сетевым природным газом значительным образом зависят от расстояния до газифицируемого объекта. Следовательно, целесообразность применения определенного варианта будет зависеть от удаленности населенных пунктов от

опорного пункта газоснабжения. Применение систем снабжения СПГ эффективно при расстоянии до газифицируемого объекта больше, чем приведенные в табл. 1.

**Алгоритм определения оптимального местоположения завода по сжижению**

Комплекс по сжижению является важным и капиталоемким звеном в технологической цепи транспорта природного газа, являясь опорным пунктом систем газоснабжения. При большом количестве населенных пунктов, требующих обеспечения природным газом, и их значительном рассредоточении определение рационального местоположения завода по сжижению требует проведения предварительных технико-экономических исследований. Расчетная схема задачи представлена на рис. 1. Суммарная длина газопроводов-отводов определяется по формуле

$$L = \sum_{i=1}^n \left| \frac{-ax_i + y_i - b}{\sqrt{a^2 + 1}} \right|, \tag{5}$$

Согласно рис. 1 длина  $i$ -го газопровода-отвода, определится по формуле

$$l_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, \tag{6}$$

а суммарное расстояние до населенных пунктов:

$$L = \sum_{i=1}^n l_i = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}, \tag{7}$$

где  $x_1, y_1; x_2, y_2, \dots, x_i, y_i, \dots, x_m, y_m$  – координаты населенных пунктов, расположенных на территории области (административного района).

В качестве целевой функции задачи примем суммарную протяженность ответвлений, тогда оптимальному решению задачи соответствует условие:

$$L = \sum_{i=1}^n l_i = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} = \min, \tag{8}$$

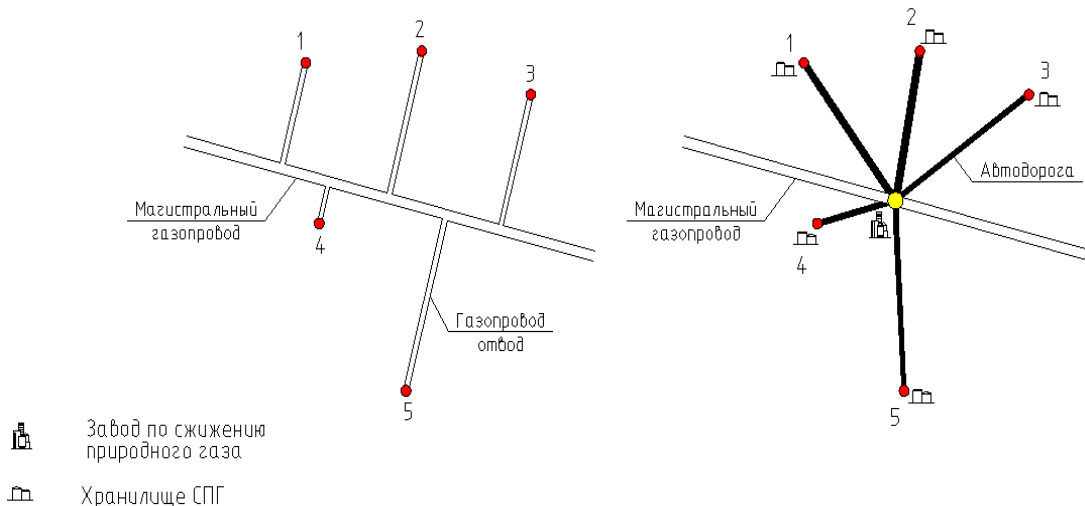


Рис. 1. Расчетная схема задачи

Так как искомая точка находится в непосредственной близости от магистрального газопровода, можно составить систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{x - x_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}} = 0 \\ y = ax + b \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{x - x_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (ax + b - y_i)^2}} = 0. \tag{9}$$

Решая полученную систему уравнений, находим оптимальные значения управляющих параметров (координаты местоположения завода)  $x_{opt}; y_{opt}$ . В целях численной реализации экономико-математической модели задачи приведем пример расчета по определению оптимальной централизации систем газоснабжения сжиженным природным газом (оптимальную посадку завода по сжижению) для условий Новосибирской области. Нанеся на карту координатную сетку, получим следующие координаты населенных пунктов (табл. 2).

Таблица 2

Исходные данные для расчета

№ населенного пункта	Координата X, км	Координата Y, км
1	10,8	125,5
2	56,7	84,4
3	78,8	52,6
4	103,7	10,3
5	147,7	119
6	184,2	35,6
7	214,3	94,7
8	270,2	76,6

Уравнение магистрального газопровода на необходимом участке зададим двумя точками с координатами:  $(0;189,7)$ ,  $(204,3;192,2)$ , получим следующие координаты завода:  $(131,5;191,3)$ . Результаты представлены на рис. 2.

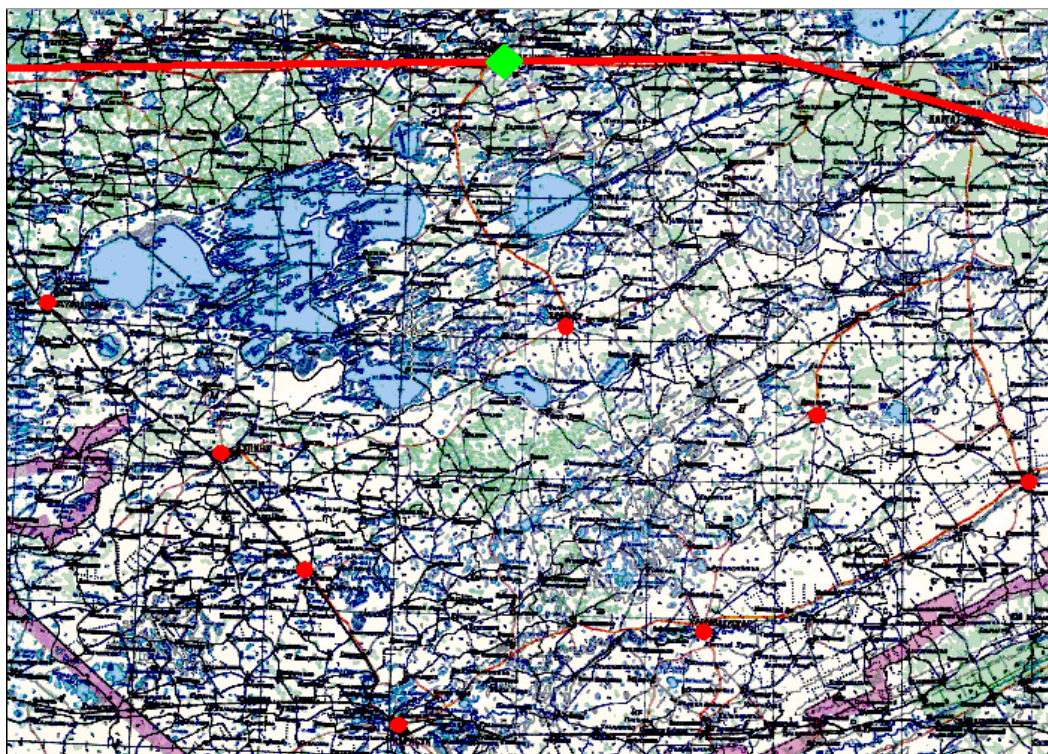


Рис. 2. К определению оптимального расположения завода по сжижению газа

На рис. 2 точками обозначены газифицируемые населенные пункты, а ромбом – месторасположение завода по производству СПГ.

## Выводы

Статья посвящена решению важной задачи – снабжению потребителей, удаленных от магистральных газопроводов природного газа, газовым топливом. Для этой цели предложен алгоритм по выявлению зон конкурентоспособного применения сжиженного природного газа по сравнению с сетевым. Основными результатами работы являются разработка рекомендаций по выбору целесообразных в конкретных условиях вариантов газоснабжения и программа по оптимальному размещению завода по сжижению природного газа. Внедрение предлагаемого метода моделирования систем газоснабжения на базе сжиженного природного газа позволит уменьшить конечную стоимость доставляемого продукта, а следовательно, повысить эффективность систем энергоснабжения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллов Н.Г. Концепция производства сжиженного природного газа для автотранспортных средств / Н.Г. Кириллов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2001. №6. С. 17-19.
2. Крылов Е.В. Газоснабжение сжиженным природным газом / Е.В. Крылов. Саратов: СГАУ, 2003. 156 с.

**Медведева Оксана Николаевна** –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», заместитель директора Строительно-архитектурно-дорожного института Саратовского государственного технического университета по научно-инновационной деятельности

**Фролов Владимир Олегович** –

аспирант кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 699.86

**Н.Н. Осипова, Н.С. Рогова**

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

*Представлены результаты технико-экономических исследований по оптимизации энергопотребления индивидуальных жилых зданий при использовании газового топлива (сжиженного углеводородного газа) на коммунально-бытовые нужды. Получены оптимальные значения сопротивлений теплопередаче ограждающих конструкций, доказана целесообразность повышения уровня тепловой защиты, определено энергопотребление зданий в зависимости от вида газоиспользующего оборудования у потребителя и режимов его эксплуатации.*

Сжиженный углеводородный газ, сопротивление теплопередаче, энергопотребление

N.N. Osipova, N.S. Rogova

## OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION OF INDIVIDUAL RESIDENTIAL BUILDINGS

*The article presents the results of feasibility studies for optimizing energy consumption of individual residential buildings in use fuel gas (LPG) on public utility needs. Authors obtained the optimum values of resistance are ploveredache-walling, the expediency of raising the level of thermal protection, energy consumption of buildings is determined depending on the type of gas-powered equipment at the consumer and its modes of exploitation.*

Liquefied petroleum gas, resistance to heat, power consumption

В настоящее время на территории Российской Федерации имеется значительное количество регионов и областей, не имеющих природного сетевого газа: Алтайский и Красноярский края, Читинская, Амурская и Омская области, республики Карелия и Бурятия и т.д. В значительной степени сложившаяся ситуация обусловлена удаленностью этих регионов от газовых месторождений и магистральных газопроводов, отсутствием крупных промышленных центров и малой плотностью населения. Аналогичная ситуация сохраняется и на обозримую перспективу. Отсутствие сетевого газа и невозможность прокладки магистральных газопроводов в перспективе предопределяют широкое развитие в этих регионах альтернативных сервисных источников топливно-энергетических ресурсов на базе сжиженного углеводородного газа (СУГ). Применение сжиженного углеводородного газа в качестве энергоносителя для технологических установок, а также бытовых и хозяйственных нужд, в полной мере отвечает социальным, экологическим и санитарно-гигиеническим требованиям потребителей.

Сложившаяся практика газопотребления показывает, что СУГ может использоваться на коммунально-бытовые нужды (пищеприготовление, включая приготовление кормов для домашних животных, горячее водоснабжение и отопление). Вид газоиспользующего оборудования у потребителя и режимы его эксплуатации определяют годовое энергопотребление здания, при этом большая доля газа используется для покрытия отопительной нагрузки. В свою очередь, отопительную нагрузку определяют габариты зданий, технические характеристики ограждающих конструкций и уровень их теплозащиты, а также климатические условия эксплуатации [1].

Уменьшение последней составляющей энергозатрат для жилых зданий возможно внедрением ряда энергосберегающих мероприятий, главным из которых является повышение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций до уровня, определяемого на основании технико-экономических расчетов. Однако большинство проводимых исследований справедливо для высотных зданий с централизованным снабжением энергетическими ресурсами, в то время как жилые здания сельских населенных пунктов, удаленных от магистралей природного сетевого газа и использующих в качестве источника производства тепловой энергии сжиженный углеводородный газ, остаются без должного внимания [2, 3]. Высокая стоимость сжиженного углеводородного газа, его транспортировки, доставки потребителю и регазификации определяет значительные вложения материальных ресурсов в создание и обеспечение теплового режима помещений [4]. В этой связи оптимизация энергопотребления жилыми зданиями является весьма актуальной задачей.

В качестве целевой функции задачи примем удельные приведенные затраты в систему обеспечения теплового режима помещения (СОТРИП) в расчете на  $1 \text{ м}^2$  ограждающей конструкции здания  $Z$ , руб/(год·м<sup>2</sup>) [5]:

$$Z = EK + II = \min, \quad (1)$$

где  $K$  – капитальные вложения в СОТРП, руб/(год·м<sup>2</sup>);  $E$  – коэффициент эффективности капитальных вложений, 1/год [6];  $I$  – расходы по эксплуатации СОТРП, руб/(год·м<sup>2</sup>).

Капитальные вложения в СОТРП в расчете на 1 м<sup>2</sup> ограждающей конструкции здания определяются по выражению

$$K = \sum_{i=1}^n K_{K,i} \delta_{K,i} + \kappa_{ym} \delta_{ym} + \frac{(t_e - t_n)}{R_e + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_{K,i}}{\lambda_{K,i}} + \frac{\delta_{ym}}{\lambda_{ym}} + R_n} \left( \frac{\kappa_{om}}{k_{npub}(t_{npub} - t_e)} + \kappa_k \right), \quad (2)$$

где  $\kappa_{K,i}$ ,  $\kappa_{ym}$  – удельные капитальные вложения в сооружение  $i$ -го конструктивного слоя и утепляющего слоя ограждения, руб/м<sup>3</sup>;  $\delta_{K,i}$ ,  $\delta_{ym}$  – толщина  $i$ -го конструктивного слоя и утепляющего слоя ограждения, м;  $\kappa_{om}$ ,  $\kappa_k$  – удельные капитальные вложения в нагревательные приборы и в отопительный котел системы отопления соответственно, руб/м<sup>2</sup>;  $k_{npub}$  – коэффициент теплопередачи нагревательных приборов, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t_n$  – расчетная температура наружного воздуха, °C;  $t_e$  – расчетная температура воздуха в помещении, °C;  $t_{npub}$  – средняя температура воды в нагревательных приборах, °C;  $R_e$ ,  $R_n$  – сопротивление тепловосприятию (теплоотдаче) внутренней (наружной) поверхности ограждения, (м<sup>2</sup>·°C)/Вт;  $\lambda_{K,i}$  – теплопроводность материала  $i$ -го конструктивного слоя ограждения, Вт/(м·°C).

Расходы по эксплуатации СОТРП находятся по выражению

$$I = \varphi_{ozp} K_{ozp} + \varphi_{om} K_{om} + \frac{c_{cuz} \tau_{om,n} (t_e - t_{cp,om,n})}{(R_e + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_{K,i}}{\lambda_{K,i}} + \frac{\delta_{ym}}{\lambda_{ym}} + R_n) Q_p'' \eta_k}, \quad (3)$$

где  $\varphi_{ozp}$ ,  $\varphi_{om}$  – доля годовых отчислений на эксплуатацию ограждения и отопительной системы соответственно, 1/год [4];  $c_{cuz}$  – стоимость сжиженного углеводородного газа, руб/кг [4];  $\tau_{om,n}$  – продолжительность отопительного периода, ч/год;  $t_{cp,om,n}$  – средняя температура наружного воздуха за отопительный период, °C;  $Q_p''$  – низшая теплота сгорания сжиженного углеводородного газа, Вт·ч/кг;  $\eta_k$  – коэффициент полезного действия котла.

Преобразование выражений (2 и 3), и последующая подстановка в уравнение (1) определяет исходную целевую функцию задачи, имеющей вид функционала:

$$Z = f(\delta_{yT}). \quad (4)$$

Минимальной величине затрат  $Z_{min}$  в систему обеспечения теплового режима помещения соответствует оптимальная толщина утеплителя  $\delta_{ym}^{opt}$  при оптимальном сопротивлении теплопередаче ограждающей конструкции  $R_0^{opt}$ .

В целях практической реализации экономико-математической модели (1) - (4) были проведены соответствующие расчеты.

1. В качестве объектов разработки приняты усадебные здания с жилой площадью  $F = 81$  м<sup>2</sup>.
2. Влияние климатических условий учитывалось варьированием расчетов по климатическим зонам эксплуатации зданий: умеренно-теплая зона (представительный пункт – г. Краснодар) и холодная зона (представительный пункт – г. Екатеринбург).
3. Конструкции наружной стены, перекрытия с холодным подвалом и перекрытия с чердаком приняты с утеплителем – минераловатные плиты.

Результаты проведенных расчетов приводятся в табл. 1.

Анализ табл. 1 показывает, что предлагаемое авторами оптимальное сопротивление теплопередаче во всех климатических зонах эксплуатации зданий существенно (в 1,4 - 1,9 раза) превышает нормативные значения. Данное обстоятельство вполне закономерно из-за высокой стоимости используемого энергоресурса (сжиженный углеводородный газ) и вскрывает дополнительные резервы энергосбережения в части энергопотребления жилыми зданиями.

Значения сопротивлений теплопередаче ограждающих конструкций

Сопротивление теплопередаче ограждений, м <sup>2</sup> К/Вт	Климатическая зона эксплуатации ограждающей конструкции	
	умеренно-теплая	холодная
наружная стена		
по условиям энергосбережения, согласно [7]	2,23	3,4
оптимальное $R_{0,opt}^{cm}$	3,53	5,32
перекрытие над холодным подвалом		
по условиям энергосбережения, согласно [7]	2,97	4,47
оптимальное $R_{0,opt}^{nxn}$	4,25	6,72
перекрытие с чердаком		
по условиям энергосбережения, согласно [7]	2,97	4,47
оптимальное $R_{0,opt}^{nc}$	5,13	7,03
оконное заполнение		
по условиям энергосбережения, согласно [7]	0,33	0,58
оптимальное $R_{0,opt}^{ok}$	0,65	0,8

Для оценки целесообразности предлагаемых решений по повышению тепловой защиты ограждающих конструкций здания определим срок окупаемости дополнительных капитальных вложений в указанные мероприятия при изменении сопротивлений теплопередаче ограждений с требуемого сопротивления по условиям санитарной гигиены,  $R_0^{mp}$  до значений, рекомендуемых авторами  $R_{0,opt}$  [7]:

$$Z = \frac{\Delta K}{\Delta I} = \frac{K_{R_{0,opt}} - K_{R_0^{mp}}}{I_{R_0^{mp}} - I_{R_{0,opt}}}, \quad (5)$$

где  $K_{R_{0,opt}}, K_{R_0^{mp}}$  – капитальные вложения в СОТРП при соответствующих значениях сопротивлений теплопередаче ограждений, руб/м<sup>2</sup>;  $I_{R_0^{mp}}, I_{R_{0,opt}}$  – расходы по эксплуатации СОТРП при тех же условиях, руб/год·м<sup>2</sup>.

Обозначим через  $\Delta K_1$  и  $\Delta K_2$  абсолютную погрешность определения капитальных вложений по сравниваемым вариантам ограждений, а через  $\Delta I_1$  и  $\Delta I_2$  – погрешность определения эксплуатационных расходов. Тогда:

1) погрешность определения разности капитальных вложений, руб/м<sup>2</sup>:

$$\Delta K = \pm \sqrt{\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2}, \quad (6)$$

2) погрешность определения разности эксплуатационных расходов, руб/год·м<sup>2</sup>:

$$\Delta I = \pm \sqrt{\Delta I_1^2 + \Delta I_2^2}, \quad (7)$$

Погрешность определения срока окупаемости дополнительных капитальных вложений определяется по формуле

$$\Delta Z = \pm \frac{K_1 - K_2}{I_2 - I_1} \sqrt{\left(\frac{\Delta K}{K_1 - K_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I_2 - I_1}\right)^2}. \quad (8)$$



Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений с учетом погрешности исчисления затрат составляет,  $Z \pm \Delta Z$ , лет, в том числе:

- 1) на верхней границе, лет:  $Z'' = Z + \Delta Z$ ;
- 2) на нижней границе, лет:  $Z' = Z - \Delta Z$ .

Диапазон от  $Z'$  до  $Z''$  характеризует зону экономической неопределенности, внутри которой все значения срока окупаемости равновозможны. Целесообразность реализации варианта с повышенными капитальными вложениями (вариант ограждения с повышенной теплозащитой) отвечает условию  $Z_0 \geq Z''$ , где  $Z_0$  – предельный срок окупаемости капитальных вложений, принимаемый равным,  $Z_0 = 10$  лет.

Согласно выражениям (5) - (8) были проведены соответствующие расчеты по определению срока окупаемости дополнительных капитальных вложений в повышение тепловой защиты ограждающих конструкций здания. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений в повышение тепловой защиты ограждающих конструкций здания

Климатическая зона эксплуатации ограждающих конструкций	Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений $Z \pm \Delta Z$ , лет	
	на верхней границе затрат $Z + \Delta Z$	на нижней границе затрат $Z - \Delta Z$
наружная стена		
умеренно-теплая	2,12	0,78
холодная	4,12	2,66
перекрытие над холодным подвалом		
умеренно-теплая	9,74	5,12
холодная	7,8	5,13
перекрытие с чердаком		
умеренно-теплая	4,41	2,79
холодная	3,93	2,85
оконное заполнение		
умеренно-теплая	9,88	8,8
холодная	6,88	5,2

Как видно из табл. 2, повышение сопротивлений теплопередаче ограждающих конструкций до значений, рекомендуемых авторами, экономически оправданно. Условие  $Z_0 \geq Z + \Delta Z$  определяет целесообразность реализации варианта с повышенными капитальными вложениями.

Годовое энергопотребление определяется годовым расходом газа, который, в свою очередь, для здания усадебного типа оптимальной конфигурации, кг/год, определяется по формуле [6]:

$$g_{год} = g_{год,н2} + g_{год,гв} + \frac{26,4a(t_g - t_{cp.o.n.})\tau_{o.n.}}{Q_p \eta_k z_{om}} \left( \frac{0,82b}{R_{0,opt}^{cm}} + \frac{0,18b}{R_{0,opt}^{ok}} + \frac{0,9a^2}{R_{0,opt}^{nxn}} + \frac{0,9a^2}{R_{0,opt}^{nч}} \right). \quad (9)$$

где  $g_{год,н2}$ ,  $g_{год,гв}$  – годовой расход газа на пищеприготовление и горячее водоснабжение здания, соответственно, кг/год [8];  $a$ ,  $b$  – линейные размеры ограждающих конструкций здания, м;  $z_{om}$  – продолжительность периода натопа в сутки, ч;  $R_{0,opt}^{cm}$ ,  $R_{0,opt}^{ok}$ ,  $R_{0,opt}^{nxn}$ ,  $R_{0,opt}^{nч}$  – оптимальные

сопротивления теплопередаче стены, оконного заполнения, перекрытия с холодным подвалом, перекрытия с чердаком соответственно, Вт/м<sup>20</sup>С (табл. 1).

Для определения величины годового энергопотребления с учетом результатов экономико-математических исследований (табл. 1) были проведены соответствующие расчеты. В качестве исходных предпосылок для расчета использовались следующие данные:

1. Объекты газоснабжения: здания усадебные с жилой площадью  $F = 81 \text{ м}^2$ ; коттеджные с жилой площадью  $F = 162 \text{ м}^2$ .

2. Сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций приняты: в соответствии с рекомендациями [7] и в соответствии с рекомендациями авторов, представленных в табл. 1.

3. В качестве газоиспользующих установок приняты: газовые плиты, газовые проточные водонагреватели, газовые отопительные котлы и газовые отопительные печи.

4. Эксплуатация газовых отопительных печей предусмотрена в двух вариантах: в условиях периодического натопа; в условиях непрерывного горения.

Результаты расчетов приводятся в табл. 3.

Таблица 3

Расчет энергопотребления индивидуальными жилыми зданиями

Характеристика объекта газоснабжения	Годовой расход газа, $g_{год}$ , кг/год		Годовое энергопотребление, $Q_{год}$ , МВт·ч/год	
	согласно рекомендациям [7]	согласно рекомендациям табл. 1	согласно рекомендациям [7]	согласно рекомендациям табл. 1
Усадебные здания; газовые плиты и печи (котлы) непрерывного действия	$\frac{2349,6}{1237,1}$	$\frac{1525}{726}$	$\frac{31,42}{16,54}$	$\frac{20,39}{9,71}$
Усадебные здания; газовые плиты, газовые печи периодического действия	$\frac{3133}{1644,3}$	$\frac{2013}{974}$	$\frac{41,90}{21,99}$	$\frac{26,92}{13,03}$
Коттеджные здания, газовые плиты, водонагреватели и газовые отопительные котлы	$\frac{4050}{2102,5}$	$\frac{2625}{1237}$	$\frac{54,17}{28,12}$	$\frac{35,11}{16,54}$

Примечание к табл. 3: в числителе холодная климатическая зона; в знаменателе – умеренно – теплая климатическая зона.

### Вывод

На основе разработанной экономико-математической модели доказано, что адекватное повышение тепловой защиты индивидуальных жилых зданий приводит к значительной экономии газового топлива. Годовое энергопотребление зданий снижается при любом виде газового оборудования и режимах его использования, при этом экономия газа составляет до 70%. Реализация мер по увеличению значений сопротивлений теплопередаче позволит значительно повысить экономичность систем газоснабжения сельских населенных пунктов и обеспечить доступность газового топлива для населения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Курицын Б.Н. Технико-экономическое обоснование систем газоснабжения на базе резервуарных установок сжиженного газа / Б.Н. Курицын, Н.Н. Осипова // Вестник гражданских инженеров. СПб.: СПбГАСУ, 2010. № 1 (22). С. 134-141.
2. Самарин О.Д. Теплофизические и технико-экономические основы теплотехнической безопасности и энергосбережения в здании / О.Д. Самарин. М.: МГСУ, 2007. 158 с.
3. Табунщиков Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий // Ю.А. Табунщиков, М.М. Бородач. М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. 194 с.
4. Курицын Б.Н. Системы снабжения сжиженным газом: учеб. пособие / Б.Н. Курицын. Саратов: СПИ, 1992. 196 с.
5. Осипова Н.Н. Оптимизация тепловой защиты зданий в условиях динамики стоимости энергоресурсов / Н.Н. Осипова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. Волгоград: ВГАСУ, 2010. №18(37). С. 98-104.
6. Курицын Б.Н. Технико-экономическая оптимизация систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: учеб. пособие / Б.Н. Курицын, Н.Н. Осипова. Саратов: СГТУ, 2009. 78 с.
7. СП 42-101-2003. Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб. М.: ФГУП ЦПП, 2004. 108 с.
8. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. Введ. 2003-10-01. М.: ФГУП ЦПП, 2003. 23 с.

**Осипова Наталия Николаевна –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Саратовского государственного технического университета

**Рогова Нина Сергеевна –**

магистрант кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 51.001.57:681.518

**В.В. Киселев, А.Е. Руденко, М.С. Светлов**

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИЯ С КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ

*Рассматриваются вопросы моделирования и исследования одночастотных сетей цифрового эфирного телерадиовещания стандарта DVB-T. Основное внимание уделено квадратурной амплитудной манипуляции QAM и OQAM. Результаты моделирования используются при расчете помехозащищенности телерадиовещания при переходе на цифровой формат.*

Модель радиоканала, одночастотная сеть, цифровое телерадиовещание, стандарт DVB-T

**V.V. Kiselev, A.E. Rudenko, M.S. Svetlov**

### SIMULATION OF THE DIGITAL TELEVISION BROADCASTING SYSTEMS WITH QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION

*The problems of simulation and analysis of the single frequency digital television broadcasting nets under the DVB-T standard are discussed. The main point of investigation is the quadrature amplitude modulation QAM and OQAM. The simulation results are used in calculation of the noise immunity of the digital television broadcasting systems.*

Digital TV, quadrature amplitude modulation QAM, Offset QAM, DVB-T

В системах передачи информации, использующих радиоканал, одной из главных проблем является помехозащищенность передаваемых сигналов. К таким системам можно отнести различные системы связи с космическими объектами, летательными аппаратами, а также, например, сети эфирного наземного телерадиовещания.

Разработанная математическая модель системы цифрового эфирного телерадиовещания позволяет предложить как более эффективный описанный ниже метод амплитудной квадратурной манипуляции.

Классический OFDM/QAM сигнал описывается уравнением

$$z(t) = \operatorname{Re} \left[ \exp(2\pi j f t) \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{N-1} \sum_{h=H_{\min}}^{H_{\max}} (C_{r,s,h}(t) \times \Psi_{r,s,h}(t)) \right], \quad (1)$$

$$\Psi_{r,s,h}(t) = \begin{cases} \exp(2\pi j h' (t - T_g - sT_s - NrT_s)/T_u) & \text{для } (s + Nr)T_s \leq t \leq (s + Nr + 1)T_s, \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}, \quad (2)$$

$$h' = h - (H_{\max} - H_{\min})/2, \quad (3)$$

$$T_s = T_u + T_g, \quad (4)$$

где  $N$  – количество OFDM-символов в кадре передачи;  $h$  – номер поднесущей частоты;  $H_{\min}$  и  $H_{\max}$  – соответственно минимальное и максимальное значения поднесущей частоты (нижняя и верхняя границы);  $s$  – номер OFDM-символа,  $r$  – номер кадра передачи;  $T_g$  – защитный интервал;  $T_u$  – длительность полезной части OFDM-символа;  $T_s$  – длительность OFDM-символа;  $f$  – опорная частота передатчика;  $C_{r,s,h}(t)$  – значение QAM-ячейки для поднесущей частоты  $h$  в символе  $s$  кадра  $r$ .

Амплитудной квадратурной манипуляцией QAM передаваемый сигнал кодируется одновременным изменением амплитуды синфазной  $I$  и квадратурной  $Q$  компонент несущего гармонического колебания  $F$ , которые сдвинуты по фазе друг относительно друга на угол  $\pi/2$ :

$$C_{r,s,h}(t) = A_{r,s,h} \exp(2\pi Ft + \varphi_{r,s,h}), \quad (5)$$

$$A_{r,s,h} = \sqrt{Q_{r,s,h}^2 + I_{r,s,h}^2}, \quad (6)$$

$$\varphi_{r,s,h} = \arctg(Q_{r,s,h}/I_{r,s,h}), \quad (7)$$

где  $A_{r,s,h}$  и  $\varphi_{r,s,h}$  – амплитуды и фазы модулированного сигнала соответственно. В комплексном виде  $C_{r,s,h}(t)$  (рис. 1):

$$C_{r,s,h}(t) = \operatorname{Re}\{C_{r,s,h}(t)\} + j \operatorname{Im}\{C_{r,s,h}(t)\}. \quad (8)$$

Перейдя в (1) от классической квадратурной амплитудной манипуляции QAM к квадратурной амплитудной манипуляции со сдвигом OQAM (Offset QAM), не требующей при ортогональном частотном мультиплексировании вставки защитного интервала ( $T_g = 0, T_s = T_u$ ), разделим  $C_{r,s,h}(t)$  на две комплексные составляющие таким образом, что мнимая часть сдвигается во времени на величину  $T_u/2$  относительно вещественной. Тогда будем иметь

$$z(t) = \operatorname{Re} \left[ \exp(2\pi j f t) \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{N-1} \sum_{h=H_{\min}}^{H_{\max}} (\operatorname{Re}\{C_{r,s,h}(t)\} \times \Psi_{r,s,h}(t) + j \operatorname{Im}\{C_{r,s,h}(t)\} \times \Psi_{r,s,h}(t + T_u/2)) \right], \quad (9)$$

$$\Psi_{r,s,h}(t) = \begin{cases} \exp(2\pi j h' (t/T_u - s - Nr)) & \text{для } (s + Nr)T_u \leq t \leq (s + Nr + 1)T_u, \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}. \quad (10)$$

С целью добавления помехозащищенности сигналу можно повернуть модуляционное созвездие на определённый угол  $\alpha$  так, чтобы каждая точка созвездия приобрела уникальные координаты, не повторяемые остальными точками (рис. 2). В результате, если одна из координат будет потеряна из-за интерференции, то сохранится информация о другой координате, что позволит восстановить передаваемый символ.

Тогда (5) примет вид

$$C_{r,s,h}(t) = A_{r,s,h} \exp(2\pi Ft + \varphi_{r,s,h} + \alpha). \quad (11)$$

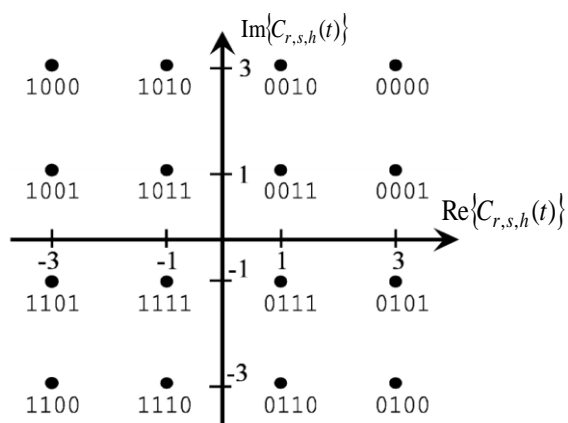


Рис. 1. Пример констелляционной диаграммы

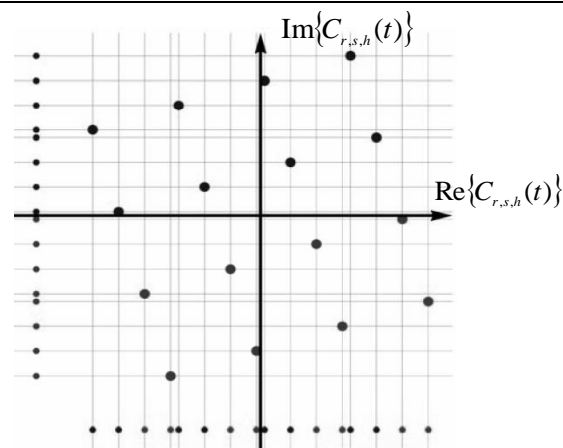


Рис. 2. Пример поворнутой констелляционной диаграммы

Таким образом, переходя в OFDM/QAM от классического QAM к OQAM и поворачивая модуляционное созвездие, можно добиться следующих результатов:

- 1) значительно увеличивается эффективность использования спектра на основе уменьшения интерференционных межсимвольных помех;
- 2) сигнал уплотняется во времени;
- 3) скорость передачи увеличивается из-за отсутствия защитного интервала;
- 4) возрастает устойчивость сигнала к типичным проблемам эфира.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Киселёв, В.В. Разработка модели и исследование помехоустойчивости цифровых систем телерадиовещания / В.В. Киселёв, М.С. Светлов // Сб. тр. МНК ММТТ-21. Саратов: СГТУ, 2008.
2. Киселёв, В.В. Проблемы электромагнитной совместимости в цифровом телерадиовещании / В.В. Киселёв, М.С. Светлов // Сб.тр. МНК ММТТ-22. Псков: ППИ, 2009.
3. Киселёв, В.В. Одночастотная сеть эфирного цифрового вещания с учётом модели местности / В.В. Киселёв, М.С. Светлов // Сб. тр. МНК ММТТ-23. Саратов: СГТУ, 2010.

**Киселев Вадим Владимирович** –

аспирант, ассистент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Руденко Алексей Евгеньевич** –

аспирант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Светлов Михаил Семенович** –

доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

В.В. Киселёв, А.А. Львов, М.С. Светлов

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ ОДНОЧАСТОТНОЙ СЕТИ ЦИФРОВОГО ВЕЩАНИЯ СТАНДАРТА DVB-T

*Рассматривается математическая модель, находящаяся в основе программного комплекса, а также его модульная структура. Результаты моделирования используются при вычислении зон охвата телерадиовещания при переходе на цифровой формат.*

Модель радиоканала, одночастотная сеть, цифровое телерадиовещание, стандарт DVB-T

V.V. Kiselev, A.A. L'vov, M.S. Svetlov

## WORKING OUT OF PROGRAM MODEL OF A UNIFREQUENT NETWORK OF A DIGITAL ANNOUNCEMENT OF STANDART DBV-T

*The mathematical model underlying a program complex, and also its modular structure is considered. The simulation results are used in calculation of the coverage areas of digital television broadcasting.*

Digital TV, simple frequency network, digital video broadcasting - terrestrial

Задача проектирования одночастотной цифровой эфирной телевизионной сети стандарта DVB-T тесно связана с построением ее математической модели, на базе которой можно определить оптимальную с точки зрения покрытия территории и одновременно эффективную с экономической стороны топологию. Программный комплекс, разрабатываемый с ориентацией на моделирование работы сети вещания в условиях многолучевого распространения сигнала и учитывающий модель местности [1] с взаиморасположением на ней передатчиков, предоставляет возможность определить топологию на стадии проектирования.

Математическая модель радиоканала с использованием модели местности [2] для случая одночастотной сети из  $K$  передатчиков (рис. 1) имеет вид

$$z_{np}(t) = z_{can}(t) + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} (z_{i,k}^{dem}(t - t_{i,k}) + z_{i,k}^{ci}(t - t_{i,k})) + n(t), \quad (1)$$

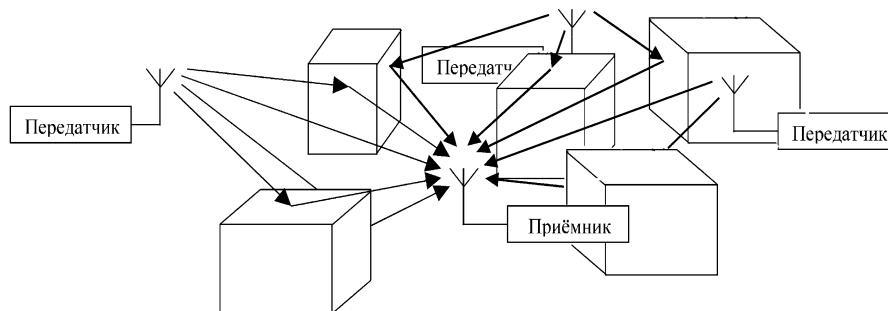


Рис. 1. Модель одночастотной сети эфирного цифрового вещания

где  $z_{np}(t)$  – принимаемый сигнал;  $t_{i,k}$  – время прихода  $i$ -го луча от  $k$ -го передатчика на вход приёмника;  $z_{смам}(t)$  – статистическая компонента сигнала, учитывающая наличие соседних каналов вещания;  $n(t)$  – аддитивный гауссов шум, связанный с флуктуациями в самом приёмнике;  $z_{i,k}^{dem}(t)$  – полезный сигнал на  $i$ -м луче  $k$ -го передатчика;  $z_{i,k}^{ct}(t)$  – случайная компонента на  $i$ -м луче для  $k$ -го передатчика, связанная с источниками активных помех и эффектом Доплера;  $M_k$  – число взаимно независимых лучей от  $k$ -го передатчика.

В свою очередь,  $z_{i,k}^{dem}(t)$  имеет вид

$$z_{i,k}^{dem}(t) = a_{i,k} z_k(t), \quad z_k(t) = \text{Re} \left[ \exp(2\pi j f_k t) \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{N-1} \sum_{h=H_{\min}}^{H_{\max}} (C_{r,s,h,k} \Psi_{r,s,h}(t)) \right], \quad (2)$$

$$\Psi_{r,s,h}(t) = \begin{cases} \exp(2\pi j h'(t - T_g - sT_s - NrT_s)/T_u) & \text{для } (s + Nr)T_s \leq t \leq (s + Nr + 1)T_s \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}, \quad (3)$$

$$h' = h - (H_{\max} - H_{\min})/2, \quad T_s = T_u + T_g, \quad (4)$$

где  $z_k(t)$  – OFDM-сигнал  $k$ -го передатчика;  $a_{i,k}$  – коэффициент, характеризующий часть полной мощности, приходящуюся на  $i$ -й луч  $k$ -го передатчика;  $N$  – количество OFDM-символов в кадре передачи;  $h$  – номер поднесущей;  $H_{\min}$  и  $H_{\max}$  – соответственно поднесущая минимальной и максимальной частоты (нижняя и верхняя границы);  $s$  – номер OFDM-символа;  $r$  – номер кадра передачи;  $T_g$  – защитный интервал;  $T_u$  – длительность полезной части OFDM-символа;  $T_s$  – длительность OFDM-символа;  $f_k$  – опорная частота или несущая  $k$ -го передатчика;  $C_{r,s,h,k}$  – значение QAM-ячейки для поднесущей  $h$  в символе  $s$  кадра  $r$   $k$ -го передатчика. Так как рассматривается одночастотная сеть вещания, то очевидно, что

$$f_1 = f_2 = \dots = f_k = f \quad \text{и} \\ C_{r,s,h,1} = C_{r,s,h,2} = \dots = C_{r,s,h,k} = C_{r,s,h}.$$

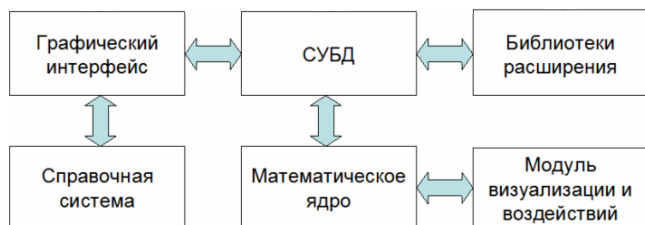


Рис. 2. Модульная структура программного комплекса

Программный комплекс, в основе которого находится математическая модель, описываемая соотношениями (1) – (4), имеет следующую структуру (рис. 2):

1. Графический интерфейс ориентирован на человека и отвечает за представление модели в виде, понятном широкому кругу специалистов.

2. Справочная система призвана помочь пользователям освоить программный комплекс.

3. Система управления базой данных отвечает за хранение объектов модели и производит требуемые трансформации структуры пользовательских данных к единому внутреннему формату.

4. Библиотеки расширения являются дополнительными модулями программного комплекса, предназначенными для расширения его возможностей введением информации о конкретном эксплуатируемом оборудовании (параметры передатчиков и приёмников, диаграммы направленности антенн и т.д.).

5. Математическое ядро выполняет основную вычислительную нагрузку и согласно заданной программе трассировкой распространения лучей на цифровой карте местности обеспечивает исполнение математической модели (1) – (4).



б. Модуль визуализации и воздействий, жёстко синхронизированный с математическим ядром, обеспечивает интерфейс между функционирующим ядром и пользователем в виде стандартных индицирующих приборов и панелей управления.

Таким образом, разрабатываемый программный комплекс позволит на основе компьютерного моделирования определить оптимальную топологию одночастотной сети эфирного телевизионного вещания на стадии проектирования с минимизацией зон неуверенного приёма и в последующем, с целью дальнейшего развития сети, учесть увеличение количества источников сигналов с совмещёнными каналами для расширения зоны охвата вещанием и достижения желаемых параметров работы, что, в свою очередь, способствует уменьшению экономических издержек при реализации проекта сети.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Киселёв, В.В. Проблемы электромагнитной совместимости в цифровом телерадиовещании / В.В. Киселёв, М.С. Светлов // Сб. тр. МНК ММТТ-22. Псков: ППИ, 2009.

2. Киселёв, В.В. Одночастотная сеть эфирного цифрового вещания с учётом модели местности / В.В. Киселёв, М.С. Светлов // Сб. тр. МНК ММТТ-23. Саратов: СГТУ, 2010.

**Киселев Вадим Владимирович** –

аспирант, ассистент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Львов Алексей Арленович** –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Светлов Михаил Семенович** –

доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 51.001.57:681.518

**В.В. Киселёв, А.А. Львов, М.С. Светлов**

#### **ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОДНОЧАСТОТНЫХ СЕТЕЙ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИЯ СТАНДАРТА DVB-T**

*Рассматриваются вопросы моделирования и исследования одночастотных сетей цифрового эфирного телерадиовещания стандарта DVB-T. Основное внимание уделено учету особенностей распространения радиосигналов в условиях многолучевого переотражения. Результаты моделирования используются при расчете зон охвата телерадиовещания при переходе на цифровой формат.*

Модель радиоканала, одночастотная сеть, цифровое телерадиовещание, стандарт DVB-T

## THE FEATURES OF SIMULATION OF SINGLE FREQUENCY DIGITAL TELEVISION BROADCASTING NETS UNDER THE DVB-T STANDARD

*The problems of simulation and analysis of the single frequency digital television broadcasting nets under the DVB-T standard are discussed. The main point of investigation is the allowance for signal spreading in the mutibeam re-reflection environment. The simulation results are used in calculation of the coverage areas of digital television broadcasting.*

Digital TV, simple frequency network, digital video broadcasting - terrestrial

При проектировании одночастотных сетей цифрового эфирного телерадиовещания стандарта DVB-T, базирующихся на высокоскоростной когерентной модуляции COFDM и работающих в условиях многолучевого распространения сигналов, необходимо учитывать модель рельефа местности [1] и взаиморасположение на ней передатчиков. Это обеспечивает возможность более эффективно использовать группу маломощных передатчиков или ретрансляторов вместо одного мощного передатчика.

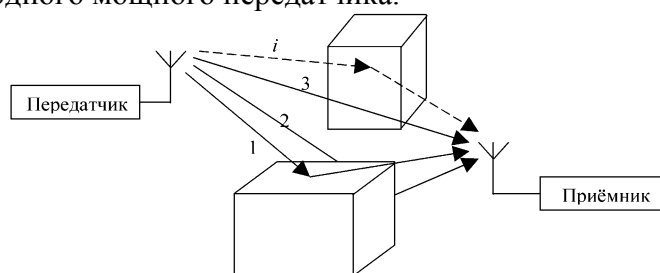


Рис. 1. Многолучевая модель распространения радиосигнала

В общем случае сигнал  $z_{np}(t)$  (рисунок 1), принимаемый приёмником, имеет вид

$$z_{np}(t) = \sum_{i=1}^M z_i^*(t) + n(t), \quad (1)$$

где  $M$  – число взаимно независимых лучей, поступающих на вход приёмного устройства;  $n(t)$  – аддитивный гауссов шум, связанный с флуктуациями в самом приёмнике;  $z_i^*(t)$  – сигнал на  $i$ -м луче.

При учёте наличия соседних каналов вещания модель (1) примет вид

$$z_{np}(t) = z_{сман}(t) + \sum_{i=1}^M z_i^*(t) + n(t), \quad (2)$$

где  $z_{сман}(t)$  – статистическая компонента сигнала, связанная с влиянием соседних каналов (проблема электромагнитной совместимости систем аналогового и цифрового телевидения [2]).

Сигнал  $z_i^*(t)$ , действующий на входе приёмного устройства, есть сигнал передатчика  $z_i(t-t_i)$ , запаздывающий на время распространения сигнала  $t_i$  в среде, т.е. на время прихода  $i$ -го луча от передатчика на вход приёмника:

$$z_i^*(t) = z_i(t-t_i). \quad (3)$$

Тогда (2) имеет вид

$$z_{np}(t) = z_{сmam}(t) + \sum_{i=1}^M z_i(t - t_i) + n(t). \quad (4)$$

В общем случае лучи распространения сигнала можно разделить на две группы: испытывающие переотражение от неподвижных объектов и, как следствие, создающие статичное распределение мощности сигнала в пространстве, т.е. детерминированное, а также, взаимодействующие с подвижными объектами и создающие изменяющееся во времени распределение мощности, т.е. случайное.

Тогда (4) примет вид

$$z_{np}(t) = z_{сmam}(t) + \sum_{i=1}^M (z_i^{\partial em}(t - t_i) + z_i^{cl}(t - t_i)) + n(t), \quad (5)$$

где  $z_i^{\partial em}(t)$  – детерминированная компонента на  $i$ -м луче, представляющая собой непосредственно передаваемый сигнал;  $z_i^{cl}(t)$  – случайная компонента на  $i$ -м луче, связанная с взаимодействием передаваемого сигнала с подвижными объектами и эффектом Доплера.

Величина  $z_i^{cl}(t)$  – функция от плотности распределения параметров компонент сигнала  $w(\varepsilon, \varphi)$ , зависящая от модели рельефа местности:

$$z_i^{cl}(t) = f(w(\varepsilon, \varphi)), \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент передачи (переотражения);  $\varphi$  – фаза сигнала после переотражения.

Учёт  $z_i^{cl}(t)$  возможен при наличии полной информации о подвижных объектах на модели рельефа местности, т.е. при известных значениях начальных координат, скоростей, ускорений, траекторий движения, габаритных размеров объектов.

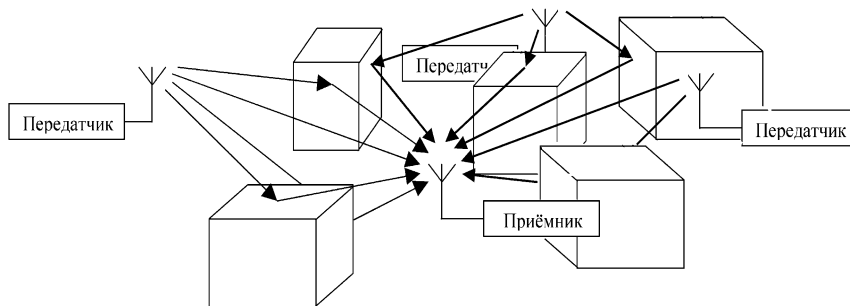


Рис. 2. Модель одночастотной сети эфирного цифрового вещания

Обобщая модель (5) на случай одночастотной сети (рис. 2) из  $K$  передатчиков [3], будем иметь

$$z_{np}(t) = z_{сmam}(t) + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} (z_{i,k}^{\partial em}(t - t_{i,k}) + z_{i,k}^{cl}(t - t_{i,k})) + n(t), \quad (7)$$

где  $K$  – общее число передатчиков;  $t_{i,k}$  – время прихода  $i$ -го луча от  $k$ -го передатчика на вход приёмника;  $z_{i,k}^{\partial em}(t)$  – полезный сигнал на  $i$ -м луче от  $k$ -го передатчика;  $z_{i,k}^{cl}(t)$  – случайная компонента на  $i$ -м луче для  $k$ -го передатчика;  $M_k$  – число взаимно независимых лучей от  $k$ -го передатчика.

В свою очередь,  $z_{i,k}^{\partial em}(t)$  имеет вид (рис. 3, 4):

$$z_{i,k}^{\partial em}(t) = a_{i,k} z_k(t), \quad (8)$$

$$z_k(t) = \text{Re} \left[ \exp(2\pi j f_k t) \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{N-1} \sum_{h=H_{\min}}^{H_{\max}} (C_{r,s,h,k} \Psi_{r,s,h}(t)) \right], \quad (9)$$

$$\Psi_{r,s,h}(t) = \begin{cases} \exp(2\pi j h'(t - T_g - sT_s - NrT_s)/T_u) & \text{для } (s + Nr)T_s \leq t \leq (s + Nr + 1)T_s, \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}, \quad (10)$$

$$h' = h + (H_{\max} - H_{\min})/2, \quad (11)$$

$$T_s = T_u + T_g, \quad (12)$$

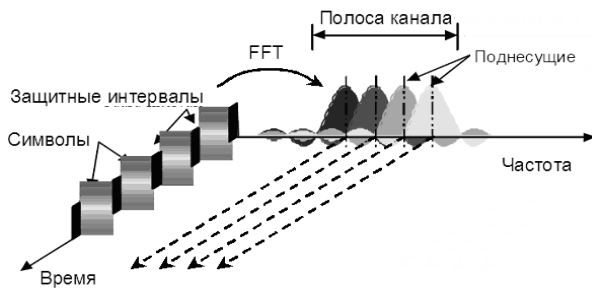


Рис. 3. Частотно-временная структура OFDM-кадра

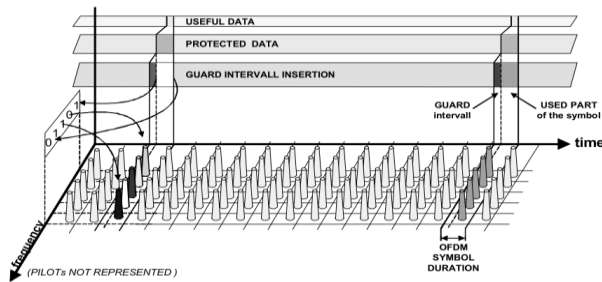


Рис. 4. Логическая структура OFDM-кадра, отражающая распределение данных по OFDM-символам с учётом защитного интервала

где  $z_k(t)$  – OFDM-сигнал  $k$ -го передатчика (получаемый с использованием быстрого преобразования Фурье (FFT));  $a_{i,k}$  – коэффициент, характеризующий часть полной мощности, приходящуюся на  $i$ -й луч  $k$ -го передатчика (зависит от диаграммы направленности антенны);  $N$  – количество OFDM-символов в кадре передачи;  $h$  – номер поднесущей частоты;  $H_{\min}$  и  $H_{\max}$  – соответственно минимальное и максимальное значения поднесущей частоты (нижняя и верхняя границы диапазона изменения поднесущей частоты);  $s$  – номер OFDM-символа;  $r$  – номер кадра передачи;  $T_g$  – длительность защитного интервала;  $T_u$  – длительность полезной части OFDM-символа;  $T_s$  – длительность OFDM-символа;  $f_k$  – опорная частота (значение несущей частоты  $k$ -го передатчика);  $C_{r,s,h,k}$  – значение QAM-ячейки для поднесущей частоты  $h$  в символе  $s$  кадра  $r$   $k$ -го передатчика.

Так как рассматривается одночастотная сеть вещания, то  $f_1 = f_2 = \dots = f_k = f$  и  $C_{r,s,h,1} = C_{r,s,h,2} = \dots = C_{r,s,h,k} = C_{r,s,h}$ .

Время прихода  $i$ -го луча от  $k$ -го передатчика  $t_{i,k}$  – промежуток времени, затраченный электромагнитной волной на преодоление расстояния от передатчика до приёмника:

$$t_{i,k} = s_{i,k}/c, \quad (13)$$

где  $c$  – скорость электромагнитной волны в среде;  $s_{i,k}$  – длина траектории  $i$ -го луча  $k$ -го передатчика.

В зависимости от вида траектории распространения сигнала возможны следующие важные, с практической точки зрения, случаи:

прямолинейное распространение:

$$s_{i,k} = \sqrt{(\Delta x_k)^2 + (\Delta y_k)^2 + (\Delta z_k)^2}, \quad (14)$$

где  $\Delta x_k$ ,  $\Delta y_k$  и  $\Delta z_k$  – разности соответствующих декартовых координат расположения приёмной антенны и передающей антенны  $k$ -го передатчика;

множественное переотражение:

$$s_{i,k} = \sum_{l=1}^{L_{i,k}} \sqrt{(\Delta x_{k,l})^2 + (\Delta y_{k,l})^2 + (\Delta z_{k,l})^2}, \quad (15)$$

где  $L_{i,k}$  – количество переотражений  $i$ -го луча  $k$ -го передатчика;  $\Delta x_{k,l}$ ,  $\Delta y_{k,l}$  и  $\Delta z_{k,l}$  – разности соответствующих декартовых координат точек рефракций для  $i$ -го луча  $k$ -го передатчика.



Рис. 5. Вариант реализации одночастотной сети из трех передатчиков

Таким образом, соотношения (7) - (15) позволяют на стадии проектирования определить оптимальные параметры топологии одночастотной сети цифрового эфирного наземного телерадиовещания с минимизацией числа и площадей зон неуверенного приёма (зон радиотени) (рис. 5).

В последующем с целью дальнейшего развития сети возможно учесть увеличение количества источников сигналов с совмещёнными каналами для расширения зоны охвата вещанием и достижения желаемых параметров работы сети.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Киселёв В.В. Разработка модели и исследование помехоустойчивости цифровых систем телерадиовещания / В.В. Киселёв, М.С. Светлов // Сб.тр. МНК ММТТ-21. Саратов: СГТУ, 2008.
2. Киселёв В.В. Проблемы электромагнитной совместимости в цифровом телерадиовещании / В.В. Киселёв, М.С. Светлов // Сб.тр. МНК ММТТ-22. Псков: ППИ, 2009.
3. Киселёв В.В. Одночастотная сеть эфирного цифрового вещания с учётом модели местности / В.В. Киселёв, М.С. Светлов // Сб. тр. МНК ММТТ-23. Саратов: СГТУ, 2010.

**Киселев Вадим Владимирович** – аспирант, ассистент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Львов Алексей Арленович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Светлов Михаил Семенович** – доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

**С.В. Спиридонов, М.С. Светлов**

**МЕХАНИЗМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНОСТИ ФАЗ СИГНАЛОВ КАК МЕТОД  
ИСКЛЮЧЕНИЯ «ПАРАЗИТНОГО» ВЛИЯНИЯ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ  
В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИЯ СТАНДАРТА DVB-T**

*Рассматривается вопрос исключения защитного интервала в системе цифрового телерадиовещания стандарта DVB-T включением в систему механизма определения разности фаз между «полезным» и отраженным сигналами.*

Цифровое телевидение, защитный интервал, одночастотная сеть, сигнал, разность фаз

**S.V. Spiridonov, M.S. Svetlov**

**THE MECHANISM OF CALCULATION OF THE PHASE DIFFERENCE AS METHOD  
OF EXCLUDING THE PARASITICAL INFLUENCE OF THE REFLECTED SIGNALS  
IN THE DIGITAL TELEVISION SYSTEM OF DVB-T STANDART**

*The article describes the problems of parasitical influence of the reflected signals that present low capacity of the digital systems such as DVB-T. The phase difference is the effective method of avoiding of protection interval that allows to increase capacity of the system.*

Digital video broadcasting, parasitical influence, guard interval, phase difference

К настоящему времени в области цифрового телевидения стандарта DVB-T сделан существенный прорыв. Разработан стандарт DVB-T2, который является продвинутой версией своего предшественника. По мнению разработчиков усовершенствованного стандарта, основными достоинствами его являются улучшенные характеристики помехоустойчивости. Но, несмотря на все преимущества, «белым пятном» остается влияние на полезный сигнал отраженных сигналов. Несмотря на наличие современных технологий, основным методом борьбы с отраженными сигналами являются защитные интервалы, которые накладывают существенные ограничения на пропускную способность канала.

Для одночастотной сети (SFN – Single Frequency Network) типичным видом эхо-сигналов являются сигналы от соседних передатчиков, работающих на одной частоте и передающих одинаковые символы COFDM. Эти эхо-сигналы не создадут помех, если будут поступать в приемник в период защитного интервала. Чем больше защитный интервал, тем больше допустимое расстояние между передатчиками. Отказ от использования защитных интервалов для борьбы с отраженными сигналами является наиболее перспективной задачей в области построения систем цифрового телерадиовещания. Одним из вариантов решения этой задачи является метод синхронного детектирования, позволяющий детектировать отраженный сигнал, дошедший до приемника, измерением разности фаз между полезным и отраженным сигналом. Применение такого метода в системах цифрового телерадиовещания позволит полностью отказаться от защитных интервалов и, следовательно, снять ограничения, накладываемые защитными интервалами на пропускную способность канала.

Пусть полезный сигнал представлен соотношением

$$s_1 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1). \quad (1)$$

Отраженный сигнал:

$$s_2 = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2). \quad (2)$$

Найдем разность фаз между этими двумя сигналами:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (3)$$

Перемножим сигналы:

$$\overline{s_1 s_2} = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) A_2 \sin(\omega t + \varphi_2) = \frac{1}{2} A_1 A_2 [\sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \sin(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_2)] \quad (4)$$

В результате перемножения получен синус разности фаз и колебание на удвоенной частоте по сравнению с основной частотой сигналов. Метод синхронного детектирования предполагает для перемножения использовать два синусоидальных или косинусоидальных сигнала [2]. Такой подход не оптимален, т.к. в результате получается косинус разности фаз, что, из-за четности косинуса не позволяет восстановить знак разности. Синус – функция нечетная, следовательно, знак разности не теряется.

Классическим методом избавления от колебания на удвоенной частоте является использование НЧ фильтра [1, 2]. НЧ фильтрацию целесообразно использовать при аналоговой обработке, для которой вместо НЧ фильтра удобнее применить усреднение. Таким образом:

$$s_1 s_2 = \frac{1}{2} A_1 A_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \frac{1}{2\Delta t} A_1 A_2 \int_0^{\Delta t} \sin(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_2) dt \approx \frac{1}{2} A_1 A_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (5)$$

Так как для отрезка сигнала

$$\Delta t \gg T, \quad (6)$$

то

$$\int_0^{\Delta t} \sin(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_2) dt \approx \int_0^T \sin(2\omega t) dt = 0. \quad (7)$$

Следовательно, разность фаз определяется как

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \arcsin\left(2 \frac{\overline{s_1 s_2}}{A_1 A_2}\right). \quad (8)$$

Это соотношение позволяет восстановить разность фаз со знаком в диапазоне  $[-\pi/2, \pi/2]$ . Как видно из последней формулы, необходимо знать амплитуды  $A_1$  и  $A_2$ . Для вычисления амплитуд необходимо усреднить по модулю гармонический сигнал и умножить на  $\pi/2$ .

$$s_{1cpmod} = \frac{A_1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |s_1| dt = \frac{A_1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |\sin(\omega t + \varphi_1)| dt. \quad (9)$$

Для  $\Delta t \gg T$

$$\frac{A_1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |\sin(\omega t + \varphi_1)| dt \approx \frac{2A_1}{T} \int_0^{T/2} \sin(\omega t) dt = \frac{2A_1}{T} \left( \frac{1}{\omega} \cos(0) - \frac{1}{\omega} \cos(\pi) \right) = \frac{2A_1}{\pi}. \quad (10)$$

Следовательно

$$A_1 = \frac{\pi s_{1cpmod}}{2}. \quad (11)$$

Соотношение (11), как и выражение (8), выполняется тем точнее, чем больше  $\Delta t$  по сравнению с  $T$ . Для второго сигнала амплитуда  $A_2$  восстанавливается аналогичным образом. Усреднение, использованное в формулах (8) и (11), позволяет оценивать разность фаз для сильно зашумленного сигнала, что является существенным преимуществом перед другими методами.

Таким образом, на основе приведенного метода можно попытаться построить систему цифрового телерадиовещания, исключив механизм защитного интервала, реализовав на сто-

роне приемника вычисление разности фаз «полезного» сигнала и отраженного. Такое решение способствует значительному увеличению пропускной способности канала, что является критичным для таких систем как системы цифрового телерадиовещания стандарта DVB-T из-за приема/передачи большого массива данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов. Практический подход / Э. Айфичер, Б. Джервис. М.: Вильямс, 2004. 992 с.
2. Смирнов А.В. Основы цифрового телевидения: учеб. пособие / А.В. Смирнов. М.: Горячая линия-Телеком, 2001. 224 с.

**Спирidonov Сергей Викторович** –

аспирант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Светлов Михаил Семенович** –

доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 51.001.57.861.518

**М.С. Светлов, М.А. Попов, А.Е. Руденко**

#### **ПАРАМЕТРЫ КВАНТОВАНИЯ ПО ВРЕМЕНИ В DVB-H. ТЕХНОЛОГИЯ TIME SLICING**

*Проводится оценка экономии батареи мобильного терминала при использовании технологии time slicing. Описывается основная проблема приёма цифрового телевидения на мобильные терминалы и проводится расчёт процента экономии батареи в зависимости от скорости передачи данных. Полученный расчёт использован при создании программной модели цифрового телевидения формата DVB-H.*

Цифровое телевидение, DVB-H, Time slicing, квантование по времени, джиттер

**M.S. Svetlov, M.A. Popov, A.E. Rudenko**

#### **PARAMETERS OF QUANTUM AT TIMES IN DVB-H. TIME SLICING TECHNOLOGY**

*In this article the estimation of economy of battery of mobile terminal is conducted at the use of technology of time slicing. The basic problem of reception of digital television is described on mobile terminals and the calculation of percent of economy of battery is conducted depending on the rate of data. The calculation will be used when creating a software model format of digital TV DVB-H.*

Digital TV, DVB-H, Time slicing, quantization of the time, jitter



Одним из основных отличий формата цифрового телевидения DVB-H (для мобильных устройств) от DVB-T (для стационарных приемников) является использование технологии Time Slicing [1] (технология нарезки по времени передаваемых IP-пакетов). Основным условием при приеме сигналов на мобильные устройства является минимально возможное энергетическое потребление приемников. При меньшем энергопотреблении длительность работы мобильного устройства возрастает. Средняя мощность потребления любого дополнительного приемника в мобильном терминале не должна превышать 100 мВт. Это требование является следствием ограниченности емкости батареи и большой рассеиваемой мощности на миниатюрном терминале. При интеграции такой технологии в мобильном терминале требуемое снижение мощности потребления составляет свыше 90%.

Технология Time Slicing используется для увеличения срока службы батарей мобильных устройств. При этом выбранная программа или сервис, то есть информация, передается в пакетном (burst) режиме, а в интервале между пакетами приемник уходит в «спящий» режим (Off-time). Это и обеспечивает сохранение энергии батарей приемника. На рис. 1 показан цикл трансляции и периоды, ему соответствующие.

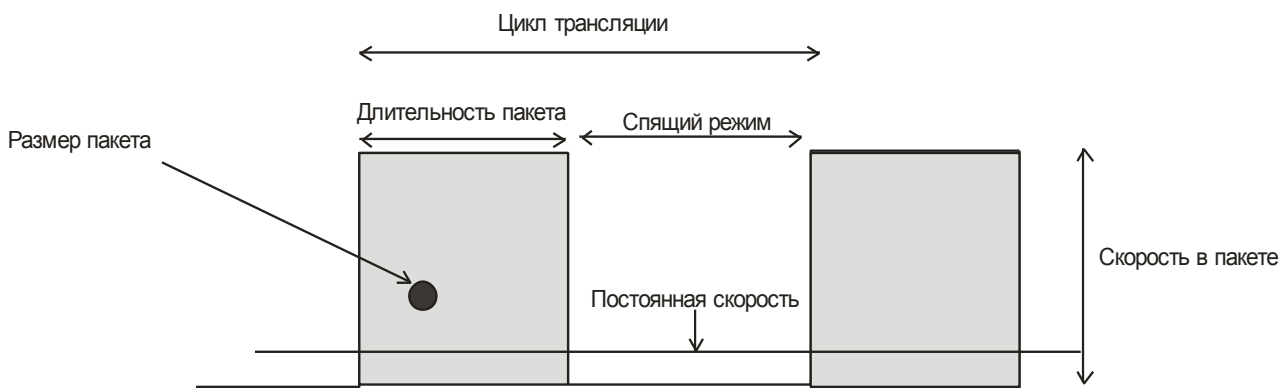


Рис. 1. Цикл трансляции IP-пакетов в стандарте DVB-H

Для расчета величины пакета воспользуемся формулой

$$B_d = B_s / (B_b \cdot 0.96), \quad (1)$$

где  $B_d$  – Burst Duration (длительность пакета), с;  $B_s$  – Burst Size (размер пакета), бит;  $B_b$  – Burst Bit rate (скорость в пакете), бит/с.

Величина 0,96 является корректирующим фактором, отражающим время, необходимое для передачи заголовков пакетов данных. Длительность «спящего» режима (Off-time) вычисляется по формуле

$$O_t = B_s / (C_b \cdot 0.96) - B_d, \quad (2)$$

где  $O_t$  – Off-time, с;  $C_b$  – Constant Bitrate (постоянная скорость), бит/с.

Таким образом

$$P_s = (1 - [B_d + S_t + (3/4 \cdot D_j) \cdot C_b \cdot 0.96] / B_s) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $P_s$  – Power Saving (процент сохранения энергии), %;  $D_j$  – Delta-t Jitter (величина джиттера), с;  $S_t$  – Synchronization Time (время синхронизации), с.

При условии, что элементарный поток содержит один канал с постоянной скоростью 350 Кбит/с и MPE-FEC [2] (многопротокольное пакетирование / упреждающая коррекция ошибок) не поддерживается, среднее время «спящего» режима равно 6,10 с.

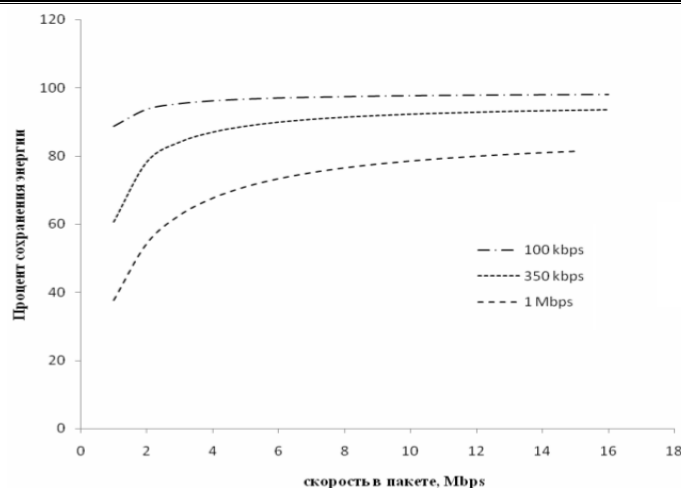


Рис. 2. Процент энергосбережения в зависимости от скорости принимаемого потока

Если принять время синхронизации равным 250 мс, величину джиттера равным 10 мс, то обеспечивается возможность сохранения 93% энергии. На рис. 2 представлен график зависимости процента энергосбережения батарей приемного устройства в зависимости от скорости принимаемого потока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ETSI EN 302 304 V1.1.1 (2004–06). Transmission System for Handheld Terminals (DVB-H).
2. Светлов М.С. Об одном из способов защиты от ошибок в системах цифрового телевидения / М.А. Попов, М.С. Светлов // ММТТ-22. Т.8. 2009.

**Попов Максим Андреевич** –

аспирант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Руденко Алексей Евгеньевич** –

аспирант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Светлов Михаил Семенович** –

доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 621.391

**А.А. Львов, А.С. Мухамбетжанов**

#### АЛГОРИТМ ЛОКАЛИЗАЦИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПИКОВ

*Рассмотрен простой алгоритм локализации спектральных пиков, позволяющий с достаточной степенью точности оценить частоту синусоиды.*

Отсчет, быстрое преобразование Фурье, растекание спектра

## AN ALGORITHM FOR LOCALIZATION OF SPECTRAL PEAKS

*A simple algorithm for localization of spectral peaks, allowing a sufficient degree of accuracy to estimate the frequency sinusoid.*

Sample, Fast Fourier Transform, the leakage of the spectrum

На практике при анализе дискретных спектров часто необходимо оценивать частоту синусоиды (или центральной частоты очень узкополосного сигнала). При использовании быстрого преобразования Фурье (БПФ) по основанию 2 частота интересующего сигнала редко совпадает с центром одного из отсчетов БПФ, частота которого известна точно. В этом случае вследствие утечки спектра дискретный спектр синусоиды, содержащей  $N$  отсчетов, может выглядеть, как на рис. 1. Видно, что максимум спектра синусоиды находится между центрами отсчетов с индексами  $m=5$  и  $m=6$ . Переменная  $m$  представляет индекс отсчетов  $N$ -точечного БПФ в частотной области. Расстояние между отсчетами по частоте составляет  $f_S/N$ , где  $f_S$  – частота дискретизации.)

Внимательное изучение рис. 1, а позволяет предположить, что частота синусоиды лежит где-то между  $m = 5$  и  $m = 5,5$ , потому что отсчет БПФ  $m = 5$  больше отсчета  $m = 6$ . Действительный синусоидальный сигнал в данном случае имеет частоту  $5.25f_S/N$  Гц. В этой ситуации погрешность измерения частоты равна половине расстояния между соседними отсчетами. Часто необходимо получить более точную оценку частоты.

Например, можно накопить,  $4N$  отсчетов сигнала и выполнить  $4N$ -точечное БПФ, в результате разность частот соседних отсчетов уменьшится до  $f_S/4N$ .

Можно также дополнить исходную последовательность из  $N$  отсчетов  $3N$  нулевыми отсчетами и выполнить  $4N$ -точечное БПФ расширенной последовательности. Это уменьшит расстояние между бинами до  $f_S/4N$ , как показано на рис. 1 б. Если максимум спектра совпадает с отсчетом  $m_{peak} = 21$ , то оценка центральной частоты имеет вид

$$f_{peak} = m_{peak} f_S / FFTsize = m_{peak} f_S / 4N. \quad (1)$$

Обе схемы, увеличение выборки сигнала и дополнение нулями, требуют существенного увеличения объема вычислений. В научной литературе [2] описаны другие методы повышения точности измерения частоты, но большинство из них направлены на повышение точности без

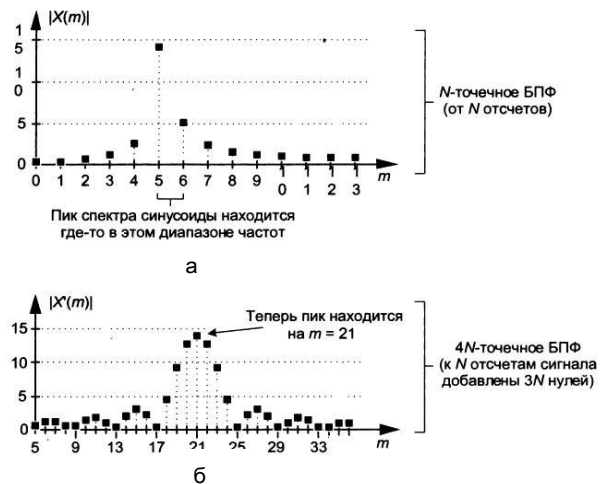


Рис. 1. Амплитудные спектры: а – для  $N$ -точечного БПФ; б – для  $4N$ -точечного БПФ

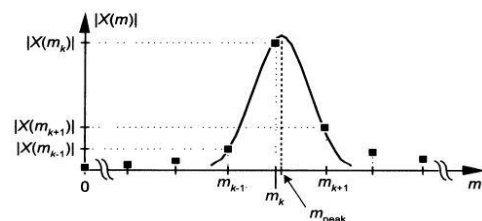


Рис. 2. Модули отсчетов БПФ узкополосного сигнала

учета вычислительных затрат. Опишем относительно простую с точки зрения вычислений схему оценки частоты.

Предположим, что имеются отсчеты БПФ  $X(m)$  действительного узкополосного сигнала, модули которых представлены на рис. 1. Вертикальная ось здесь имеет линейный, а не логарифмический масштаб.

Центральная частота сигнала в единицах индекса  $m_{peak}$  может быть оценена как

$$m_{peak} = m_k - \text{real}(\delta), \quad (2)$$

где  $\text{real}(\delta)$  обозначает действительную часть корректирующего члена  $\delta$ , который определяется как

$$\delta = [X(m_{k+1}) - X(m_{k-1})] / [2X(m_k) - X(m_{k-1}) - X(m_{k+1})], \quad (3)$$

где  $m_k$  – целочисленный индекс наибольшего по модулю отсчета  $|X(m_k)|$ . Значения  $X(m_{k-1})$  и  $X(m_{k+1})$  представляют комплексные отсчеты спектра по обе стороны наибольшего отсчета, как показано на рис. 2.

На основе комплексных отсчетов спектра выражаем частоту сигнала через частотный индекс  $m$  (который может быть нецелым), и подставляем это значение в

$$f_{peak} = m_{peak} f_s / N \quad (4)$$

для получения оценки частоты в Гц. Оценки (2) и (3) применимы только в случае, когда большая часть энергии сигнала сосредоточена в пределах одного отсчета шириной  $(f_s / 4N)$ .

Этот алгоритм оценки пика спектра достаточно точен и прост. Ошибка оценки частоты пика составляет примерно 0,06, 0,04 и 0,03 ширины отсчета при отношениях сигнал/шум 3, 6 и 9 дБ, соответственно. Привлекательной особенностью этого алгоритма является то, что он не требует использования окон в отличие от других алгоритмов локализации пиков спектра, и использует отсчеты БПФ, не требуя вычисления их модулей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс. М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. 656 с.
2. Солонина А.И. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, Л.А. Яковлев. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 464 с.

**Львов Алексей Арленович** –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Мухамбетжанов Арман Сулейманович** –

аспирант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 62.50:621.785.33

**М.В. Мусатов, В.Б. Половикова, А.С. Моисеев, А.А. Львов**

#### **АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ТЕСТИРОВАНИЯ АЦП, ОСНОВАННЫХ НА МЕТОДЕ НАИМЕНЬШИХ КВАДАРТОВ**

*Проводится анализ применения разновидностей метода наименьших квадратов для улучшения качества оценивания параметров АЦП.*

---

Метод наименьших квадратов, аналогово-цифровой преобразователь, эффективное число бит

**M.V. Musatov, V.B. Polovikova, A.S. Moiseev, A.A. L'vov**

## **ANALYSIS OF THE ADC TESTING LEAST SQUARES TECHNIQUES**

*The article analyzes the use of varieties of the least-squares method to improve quality of parameter estimation ADC*

Least squares method, analog-to-digital converter, effective number of bites

Современная электроника активно развивается в направлении цифровых систем, которые применяются во многих областях и деятельности человека. Существенная часть сигналов, на которые необходимо реагировать цифровой системе, являются аналоговыми. Для преобразования аналоговых сигналов в цифровые используются аналого-цифровые преобразователи (АЦП) с различными характеристиками, в зависимости от области применения. В связи с этим становится актуальной задача комплексной оценки параметров АЦП с целью выделения преобразователей с требуемыми характеристиками. Существует методика испытаний АЦП на основе классического метода наименьших квадратов (МНК), подробно описанная в международном стандарте IEEE 1241-2000 [3]. В результате испытаний оцениваются следующие параметры: среднеквадратичное отклонение синусоидальной волны, восстановленной от исходного синусоидального сигнала по результатам с выхода АЦП; эффективное число бит (ENOB). Эти параметры являются одними из основных при оценке качества АЦП, однако их значения могут быть неточны из-за погрешностей измерений, связанных с параметрами эталонного сигнала и тактового генератора, задающего частоту дискретизации.

Приводится сравнительный анализ разновидностей МНК для построения алгоритмов, позволяющих существенно увеличить качество оценки параметров АЦП. В частности, рассматриваются методы, позволяющие увеличить точность оценки параметров на основе учета погрешностей тактовых сигналов (во времени) [4].

При несоблюдении основных предпосылок обычного МНК приходится корректировать модель: изменять её форму, добавлять или, наоборот, исключать факторы, преобразовывать исходные данные и т.п. Особенно часто на практике приходится сталкиваться с ситуациями, в которых возмущения модели имеют постоянную дисперсию и не коррелированы.

Нарушение условия гомоскедастичности возмущений означает, что дисперсия возмущения зависит от значений факторов. Такие регрессионные модели называются моделями с гетероскедастичностью возмущений. Если справедлива гетероскедастичность возмущений, то оценки параметров модели обычным МНК не будут эффективными. Рассчитанные значения стандартных ошибок коэффициентов уравнения регрессии могут быть заниженными, а при проверке статистической значимости коэффициентов может быть ошибочно принято решение об их значимом отличии от нуля.

Условие некоррелированности возмущений может не выполняться при построении регрессионной модели по временным рядам исследуемых переменных, где из-за наличия тенденции последующие члены ряда могут зависеть от предыдущих членов, в модели имеется автокорреляция возмущений.

При наличии автокорреляции возмущений обычный МНК дает несмещенные и состоятельные оценки параметров модели, которые, однако, неэффективны, т.е. их дисперсии не будут наименьшими. По сравнению с гетероскедастичностью возмущений автокорреляция приводит, наоборот, к завышению стандартных ошибок коэффициентов уравнения регрес-

сии. На основе таких результатов может быть сделан ошибочный вывод о несущественном влиянии исследуемого фактора на зависимую переменную.

Ковариации и дисперсии возмущений могут быть произвольными, т. е. задаваться некоторой положительно определенной матрицей  $\Omega$ :

$$\mu(\varepsilon\varepsilon^T) = \Omega, \quad (1)$$

где  $\Omega$  – ковариационная матрица вектора возмущений.

Модель множественной регрессии, для которой выполняется условие (1), называется обобщенной линейной моделью множественной регрессии (Generalized Linear Multiple Regression Model). Для получения несмещенных и наиболее эффективных оценок параметров такой модели применяют обобщенный метод наименьших квадратов (Generalized Least Squares), условие которого имеет вид:  $\mathbf{e}^T \Omega^{-1} \mathbf{e} \rightarrow \min$ .

Вектор оценок  $\mathbf{b}^*$  параметров обобщенной модели определяется как

$$\mathbf{b}^* = (\mathbf{X}^T \Omega^{-1} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \Omega^{-1} \mathbf{Y}. \quad (2)$$

На практике ковариационная матрица вектора возмущений  $\Omega$ , как правило, неизвестна, и для реализации обобщенного метода наименьших квадратов приходится вводить дополнительные условия на структуру матрицы  $\Omega$ . Поэтому устранение гетероскедастичности и автокорреляции возмущений производят раздельно, для этого используют частные случаи обобщенного метода наименьших квадратов.

Для оценки параметров модели с гетероскедастичностью возмущений используется взвешенный МНК, являющийся частным случаем обобщенного МНК.

Для применения взвешенного метода наименьших квадратов необходимо сделать предположение о значениях  $\sigma(\varepsilon_i)$ . Обычно предполагают, что среднее квадратическое отклонение возмущений пропорционально значениям одного из факторов, предположительно делающих выборочную совокупность неоднородной.

Если имеется автокорреляция возмущений, то для оценки параметров модели используют другой частный случай обобщенного метода наименьших квадратов. Пусть по временным рядам переменных  $X$  и  $Y$  строится парная линейная модель

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_t + \varepsilon_t \quad (t = 1, 2, \dots, n),$$

уравнение регрессии которой имеет вид

$$\hat{y}_t = b_0 + b_1 x_t \quad (t=1, 2, \dots, n), \quad (3)$$

где  $b_0, b_1$  – оценки параметров  $\beta_0$  и  $\beta_1$ , соответственно.

Первоначально исходные переменные и свободный член  $b_0$  уравнения регрессии преобразуются с помощью формул:

$$y'_t = y_t - r_{(1)} y_{t-1}; \quad x'_t = x_t - r_{(1)} x_{t-1}; \quad b'_0 = b_0(1 - r_{(1)}), \quad (t = 2, 3, \dots, n),$$

где  $r_{(1)}$  – коэффициент автокорреляции остатков первого порядка. В результате уравнение (3) трансформируется в уравнение

$$\hat{y}'_t = b'_0 + b_1 x'_t, \quad (t = 2, 3, \dots, n),$$

параметры которого определяются обычным МНК. После этого вычисляются свободный член  $b_0$  исходного уравнения (3) по формуле

$$b_0 = b'_0 / (1 - r_{(1)}).$$

Основным недостатком описанной выше модели, является предположение о несимметричности МНК. Для симметричной модели (в предположении, что ошибки возможны как в матрице значений факторов  $X$ , так и в векторе значений результата  $Y$ ) применяется общий метод наименьших квадратов (total least squares).

Общий метод наименьших квадратов (ОМНК) предложен Голубом и Ван Лоаном, как метод решения переопределенных систем уравнений вида  $AX \approx B$ , где  $A \in R^{m \times n}$  и  $B \in R^{m \times d}$  из-

вестные данные, а  $X \in R^{n \times d}$  неизвестные [1], и представляет обобщение метода аппроксимации с использованием классического МНК, в случае, когда матрицы  $A$  и  $B$  известны с ошибками.

Определение ОМНК связано с асимметрией классического МНК, поэтому он основан на минимизации (в смысле нормы Фробениуса) корректирующих составляющих  $\Delta A$  и  $\Delta B$  известных данных  $A$  и  $B$ , формирующих следующую систему уравнений:

$$\hat{A}X = \hat{B}, \quad \hat{A} = A + \Delta A, \text{ откуда следует } (A + \Delta A)X = B + \Delta B, \quad \hat{B} = B + \Delta B, \quad (4)$$

Задача оптимизации для системы (4) будет выглядеть следующим образом:

$$\min \|\Delta A, \Delta B\|_F, (A + \Delta A)X = B + \Delta B. \quad (5)$$

Для решения задачи оптимизации (5), определим функцию Лагранжа  $L$

$$L = \|\Delta A, \Delta B\|_F^2 + \lambda_1^T (Ax + \Delta Ax - B - \Delta B). \quad (6)$$

Геометрическая интерпретация ОМНК в линейном случае может быть представлена как минимизация суммы квадратов расстояний до прямой  $l$  [2]

$$f(l) = \sum_{i=1}^m \text{dist}((x_i, y_i), l)^2. \quad (7)$$

Для проверки работоспособности предложенных методик оценивания параметров АЦП с использованием разновидностей МНК, а также проверки качества моделирования условий испытания АЦП проведена серия экспериментов. Для проведения испытаний использовалась программа, реализованная на встроенном языке системы Matlab.

Модель синусоидального сигнала задается в следующем виде:  $y = A + B \sin(\omega t) + C \cos(\omega t)$ . Параметры синусоидального сигнала инициализированы следующими значениями  $A = 3, B = 2, C = 2, \omega = \pi/2$ . Для испытания использована модель трехразрядного АЦП, с частотой дискретизации  $\omega_{discr} = 3\pi$ .

Ниже приведены характеристики восстановленных сигналов и среднеквадратичные отклонения от исходного сигнала.

$$y_{test} = 3 + 2\sin(\pi/2) + 2\cos(\pi/2) - \text{эталонный тестовый сигнал}$$

$y_{tls} = 2.4959 + 2.0182\sin(\pi/2) + 1.9987\cos(\pi/2)$  – сигнал, восстановленный с использованием общего МНК (TLS).

$y_{tls} = 2.4959 + 2.0465\sin(\pi/2) + 1.9967\cos(\pi/2)$  – сигнал, восстановленный с использованием обобщенного МНК (GLS).

$y_{ols} = 2.4791 + 2.0465\sin(\pi/2) + 1.9666\cos(\pi/2)$  – сигнал, восстановленный с использованием классического МНК.

Анализируя представленные характеристики, можно видеть, что применение общего МНК целесообразно с точки зрения улучшения качества оценивания параметров АЦП, таких как среднеквадратическая ошибка и другие параметры, рассчитанные с её использованием.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Marquardt D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters / D. Marquardt // SIAM J. Appl. Math., 1963, Vol. 11, P. 431–441.
2. Nocedal J. Numerical Optimization / J. Nocedal, S.J. Wright, Springer, New York, 1999.
3. IEEE Standard 1241-2000 IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters.
4. Blair J. Corrected RMS error and effective number of bits for sinewave ADC tests / J. Blair, T. Linnenbrink Computer Standards and Interfaces, Vol. 26, No. 1, P. 43-49. Jan. 2004.

**Мусатов Михаил Викторович** –

аспирант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Половикова Виктория Борисовна** –

магистрант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Моисеев Антон Сергеевич** –

магистрант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Львов Алексей Арленович** –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 004.42

**Е.Р. Кожанова, А.А. Захаров, И.М. Ткаченко**

### **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВЕЙВЛЕТ-ФУНКЦИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ РАЗЛИЧНОГО ВИДА**

*Представлен интерфейс программы "Schemasrav\_1", которая является базовым программным продуктом по использованию вейвлет-функций для анализа сигналов. Рассмотрены возможности и сферы применения вейвлет-анализа как отдельного направления в области обработки данных.*

Преобразование и ряды Фурье, вейвлет-функция, вейвлет-преобразование, спектрограмма, коэффициент корреляции, уровни разложения, проверка значимости

**E.R. Kozhanova, A.A. Zaharov, I.M. Tkachenko**

### **DEVELOPMENT OF SOFTWARE PRODUCT ON THE USE OF WAVELET – FUNCTIONS FOR ANALYSIS OF SIGNALS OF DIFFERENT KIND**

*In the article the interface of the program "Schemasrav\_1", which is a base software product on the use of wavelet-functions is presented for the analysis of signals. Considering possibilities and purviews wavelet-analysis, as separate direction in area of processing of data.*

The transformation and rows Furie, wavelet-function, wavelet-transformation, spectrogram, factor to correlations, level of the decomposition, check to value

Наряду с традиционным спектральным анализом, основанным на преобразовании Фурье (рис.1), используется вейвлет-анализ, который нашел широкое применение при решении различных задач: анализа и синтеза сигналов, для обработки изображений, для сжатия больших объемов информации и цифровой фильтрации, для распознавания образов, при ре-



шении некоторых дифференциальных уравнений и т.п. Этим объясняется применение вейвлет – анализа в радиофизике, нелинейной динамике, акустике, оптике, физике твердого тела, сейсмологии, динамике жидкостей, биологии и медицине, экономике (А. Гроссман, Ж. Морле, Ч. Чуи, Э. Столниц, Н.М. Астафьева, И.М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло, А.А. Короновский, А.Е. Храмов и др.).

Преобразование Фурье (ПФ) представляет стационарный сигнал, заданный во временной области, в виде разложения по ортогональным базисным функциям (косинусам и синусам), локализуя частотные компоненты сигнала. Если сигнал нестационарен, то применяют оконное преобразование Фурье, которое рассматривает сигнал на разных промежутках времени, но в этом случае возникает проблема – выбор окна (рис. 1).

Эту проблему решает вейвлет-анализ, который представляет сигнал в виде разложения по базисным функциям (солитоноподобные функции), которые называются *вейвлетами* или *вейвлет- функциями*. Эти функции хорошо локализованы по времени и частоте, а также обладают рядом характерных признаков: базис формируется ее перемасштабированием и сдвигов вдоль оси (рис. 2).

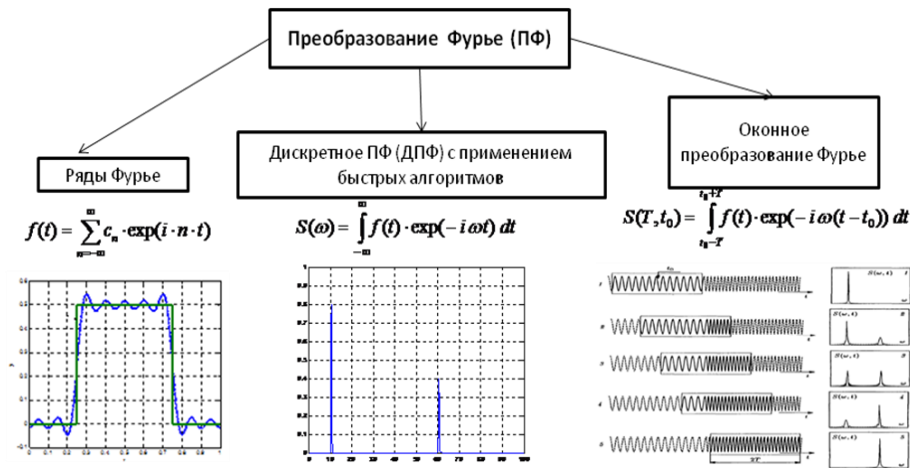


Рис. 1. Классификация преобразования Фурье

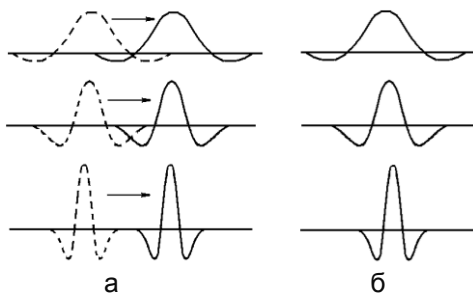


Рис. 2. Сдвиг по времени: а) и масштабирование; б) вейвлет-функции

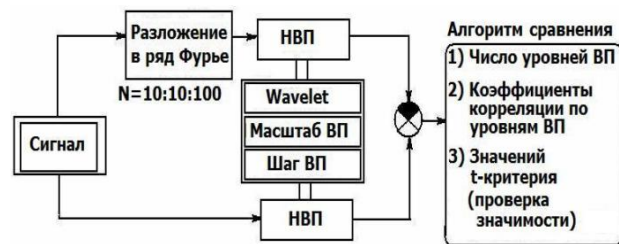


Рис. 3. Усовершенствованная схема сравнения: НВП – непрерывное вейвлет-преобразования; ВП – вейвлет-преобразование

Изучение преобразования Фурье и вейвлет-анализа, является актуальным и необходимым для студентов, бакалавров и магистров любых специальностей, занимающихся обработкой сигналов. Поэтому разработка автономного программного продукта по использованию вейвлет-функций для анализа сигналов различного вида является актуальной и может быть использована в учебном процессе вузов, которые имеют специальности, связанные с обработкой сигнала, а также исследователями и разработчиками радиотехнических устройств.

Программа "Schemasrav\_1" является первым этапом разработки и посвящена проблеме выбора базисной вейвлет-функции (ВФ) как основной проблеме вейвлет-анализа.

Авторами разработана схема сравнения двух математических аппаратов – преобразования Фурье в виде рядов Фурье и непрерывного вейвлет-преобразования (НВП) [1, 2] (рис. 3). Для того чтобы показать степень эффективности разложения этими методами и целесообразность применения вейвлет-функций для разложения и изучения различных сигналов. Для сопоставления двух объектов используют сравнение числовых значений, характеризующее эти объекты. Как правило, сравнение проводят по анализу трех видов числовых характеристик ВП [3]: статистические, энергетические и стохастические. Данные подходы применяются к вейвлет-коэффициентам и компонентам сигнала, и нашли широкое применение в вейвлет-анализе сигналов различной природы. Авторами предложен алгоритм сравнения полученных вейвлет-спектрограмм на определении меры сходства вейвлет-коэффициентов по соответствующим уровням разложения ВП (отношение масштаба ВП к шагу ВП), в виде коэффициента корреляции (КК). Использование этого метода для такого вида сравнения при обзоре литературы нами не обнаружен. Затем проводится проверка значимости полученных коэффициентов корреляции с помощью t-критерия [2].

Блок-схема программы представлена на рис. 4. При выборе математического пакета Matlab учтено:

1. Математический пакет Matlab, а также его расширения (Toolbox) широко применяется в учебном процессе и в научных исследованиях.
2. Наличие широкого диапазона готовых функций, графических средств отображения.
3. Возможность создания пользовательского Toolbox с помощью бесплатного приложения Guide. Приложения в Guide Matlab представляют графические окна с элементами управления (кнопки, списки и т.д.).
4. Приложение запускается в командной строке Command Windows Matlab.

Выполнение программы состоит из четырех последовательных шагов.

1. *Выбор сигнала.* На начальном этапе ограничимся 14 сигналами, которые показаны на рис. 5.
2. *Выбор вейвлета для НВП.* Перечень применяемых вейвлет-функций ограничен библиотекой Matlab и видом вейвлет-преобразования, в нашем случае НВП.

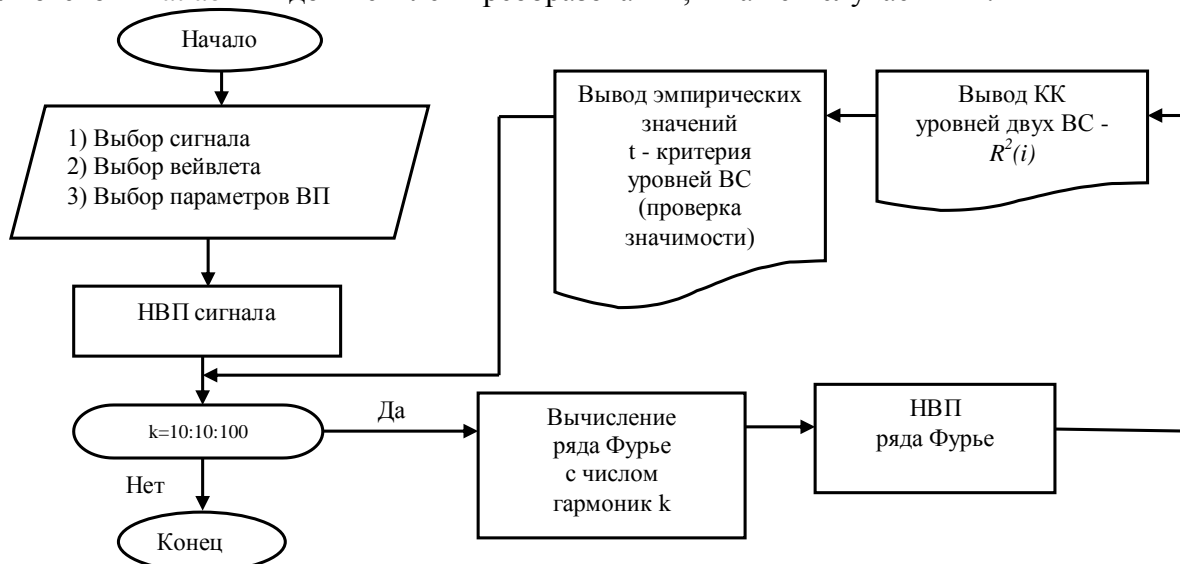


Рис. 4. Блок-схема программы: НВП – непрерывное вейвлет-преобразование; КК – коэффициент корреляции, ВС – вейвлет - спектрограмма

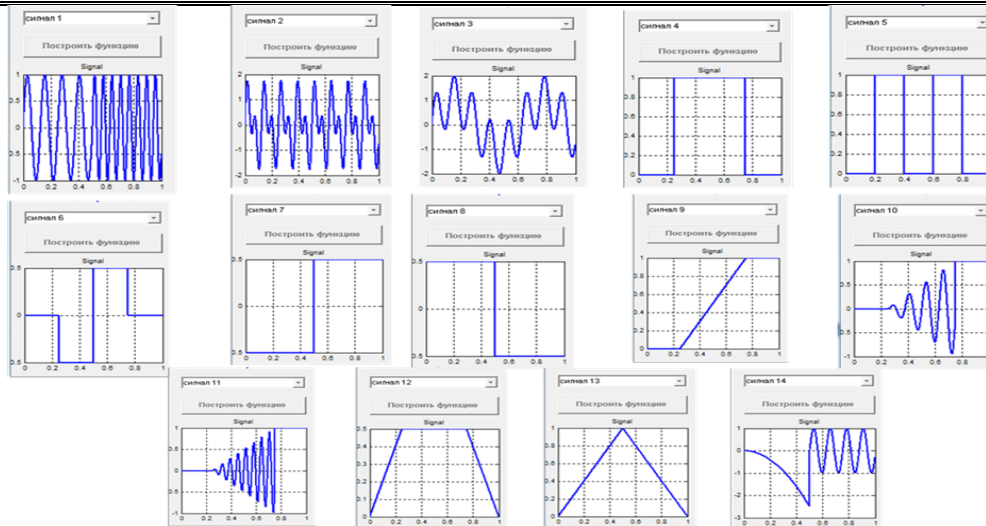
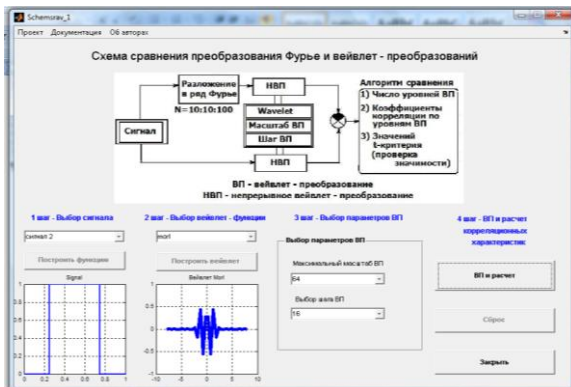


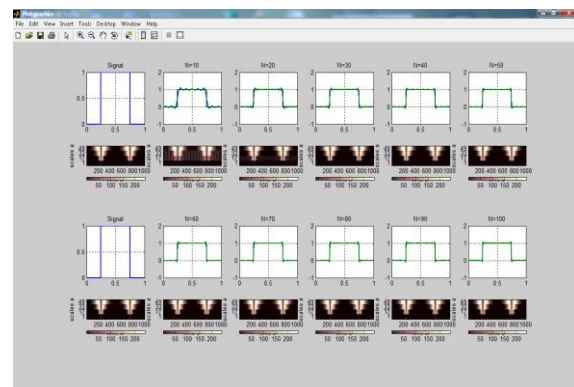
Рис. 5. Вид сигналов, применяемых в программе "Schemasrav\_1"

3. *Выбор параметров ВП.* Выбирается максимальный масштаб ВП и шаг ВП, по которым вычисляется количество уровней разложения ВП.

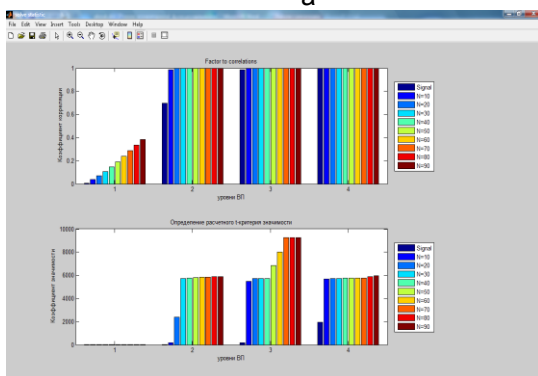
4. *Вейвлет-преобразование (ВП) и расчет корреляционных характеристик.* Строятся вейвлет-спектрограммы исходного сигнала и аппроксимирующих рядов Фурье с заданным числом гармоник ( $N = 10, 20 \dots 100$ ), определяются коэффициенты корреляции по уровням ВП и вычисляется t-критерий, по которому проверяем значимость полученных значений коэффициентов корреляции (рис. 6).



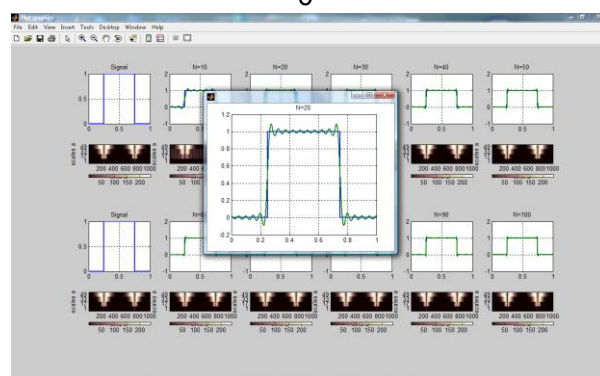
а



б



в



г

Рис. 6. Главное окно программы перед нажатием на кнопку ВП и расчет (а), результаты работы программы "Schemasrav\_1" (б, в) и дополнительная возможность программы в виде увеличения полученных графиков (г)

При разработке интерфейса программы определена последовательность переходов между элементами управления программы, что позволило обеспечить понятный и дружелюбный интерфейс.

К достоинствам программы "Schemasrav\_1" можно отнести ее дополнительные возможности: наличие меню, наличие справочного материала, возможность увеличения графиков, результаты сравнения сохраняются в файлы с расширением xls, время вычисления выводится в Command Windows (Matlab).

Расширение возможностей данной программы необходимо проводить в следующих направлениях: увеличение перечня базисных вейвлет-функций, исследование новых видов вейвлет-функций с улучшенными характеристиками, анализ возможностей применения ВП для изучения сложных сигналов, использование других видов вейвлет-преобразований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кожанова Е.Р. Сравнительные характеристики Фурье- и вейвлет-преобразований для анализа сигналов / Е.Р. Кожанова, А.А. Захаров // Радиотехника и связь : сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2009. С. 53-58.

2. Корреляционные характеристики вейвлет-функций / Е.Р. Кожанова, А.А. Захаров, И.В. Шевело, А.А. Богомолова // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2010: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2010. С. 383-387.

3. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab / Н.К. Смоленцев. М: ДМК Пресс, 2008. 448 с.

**Кожанова Евгения Романовна** –

аспирант кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

**Захаров Александр Александрович** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 004.272.34

**А.А. Машенко, А.В. Лашков, В.Ю. Мусатов, В.В. Сысоев**

#### **РАЗРАБОТКА НЕЙРОЧИПОВ НА ПЛИС ДЛЯ ОБРАБОКИ СИГНАЛОВ МУЛЬТИСЕНСОРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГАЗОВ**

*Рассматривается возможный подход аппаратной реализации нейронных сетей на ПЛИС.*

Нейронные сети, ПЛИС

**DEVELOPMENT NEUROCHIP FPGA FOR SIGNALS ANALYSIS MULTISENSOR SYSTEMS FOR IDENTIFICATION OF GAS**

*Potential approaches the hardware implementation of neural networks on FPGAs.*

Neural Networks, FPGA

В последнее время большой интерес вызывают полупроводниковые газоаналитические устройства, работающие на принципах биологической обонятельной системы и называемые часто приборами вида «электронный нос» (ЭН). Такие устройства способны стать альтернативой известным приборам, анализирующим состав газовых смесей путем анализа составляющих их компонент (спектрометры, хроматографии и пр.), для задач дешевой экспресс-диагностики. Приборы вида ЭН включают, как правило, сенсорную систему, генерирующую первичный векторный сигнал, и методы распознавания образов, сопоставляющие этот сигнал с данными, хранимыми в базе данных. Соответственно, диагностика окружающей атмосферы может быть выполнена в реальном масштабе времени.

Современные технологии позволяют изготавливать мультисенсорные системы в виде однокристалльных чипов, себестоимость изготовления которых групповыми методами микроэлектроники близка к стоимости изготовления дискретных сенсоров. Одним из наиболее ярких примеров таких мультисенсорных чипов является совместная разработка Саратовского государственного технического университета, Исследовательского Центра Карлсруэ (Германия) и университета Южного Иллинойса (США) (рис. 1) [1]. В качестве сенсорного элемента в этом чипе применяется широкозонный оксидный полупроводник (как правило, оксид олова) в виде тонкой пленки или монокристаллических нановолокон.

Для выполнения задачи распознавания векторного отклика мультисенсорной системы на классы, соответствующие газам, обычно применяются алгоритмы, реализуемые, в том числе, с помощью искусственных нейронных сетей.

Как правило, основные способы реализации искусственных нейронных сетей ограничиваются областью программного моделирования в различных средах визуального и невизуального проектирования. При этом возможности применения специализированных процессоров для отмеченных задач практически не изучены.

Тем не менее нами недавно показана успешная реализация алгоритмов распознавания векторных мультисенсорных сигналов на основе корреляционных, или хеббовских, нейронных сетей с самоорганизацией [2] с помощью нейропроцессора NM6403 [3]. Для примера на рис. 2 показаны результаты распознавания воздуха, смеси растворитель/воздух и смеси лимон/воздух с помощью нейропроцессора NM6403.

В последнее время большой интерес вызывают приборы программируемой логики, представителями которых являются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС).

Эти устройства применяются для построения разнообразных интерфейсных узлов, устройств управления и контроля и т.д. В настоящее время с появлением быстродействующих ПЛИС сверхвысокой интеграции, работающих на высоких тактовых частотах, их ниша на мировом рынке значительно расширилась. Современные образцы ПЛИС, выполненные по 0,22-микронной технологии, способны работать на частотах до 300 МГц и более, реализуют до 3 млн. эквивалентных логических вентилях. Такие мощности ПЛИС позволяют использовать их не только для реализации простых контроллеров и интерфейсных узлов, но и для цифровой обработки сигналов, сложных интеллектуальных контроллеров и нейрочипов. Поэтому интерес вызывает использование ПЛИС для реализации нейрочипов, в том числе для задач обработки векторных сигналов мультисенсорных систем.

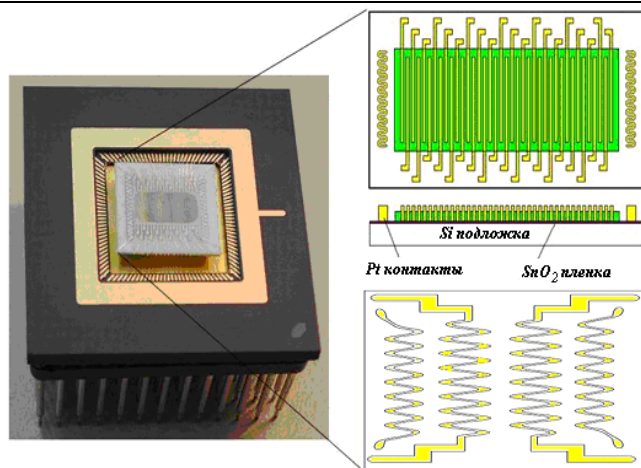


Рис. 1. Фронтальная и тыловая стороны подложки мультисенсорного чипа

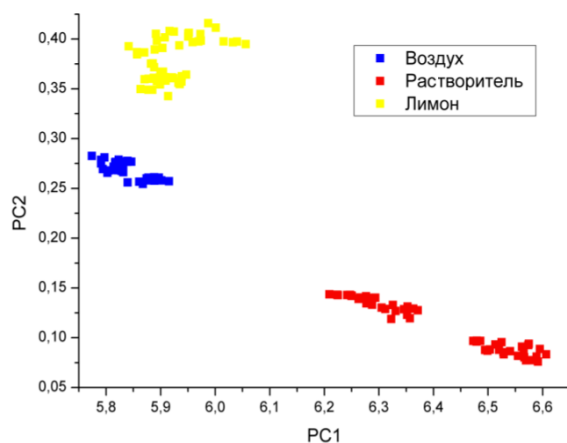


Рис. 2. Результаты распознавания газов с помощью нейропроцессора NM6403

Для этого имеются следующие предпосылки: 1) разработка проектов на ПЛИС оказывается достаточно быстрой (как правило, несколько месяцев); 2) ПЛИС из-за конструктивных особенностей могут быть эффективно использованы при реализации нейрочипов; 3) ПЛИС способны неплохо масштабироваться и достаточно дешевы; 4) производство недорогих специализированных процессоров на основе ПЛИС может быть организовано в России.

В результате работы планируется реализовать на ПЛИС нейронные сети Хебба с самоорганизацией для выполнения задачи разделения отклика мультисенсорной системы на классы, соответствующие различным газам.

В качестве элементной базы можно использовать наборы разработчика, предоставляемые производителями ПЛИС. Например, фирма Altera предлагает следующие варианты наборов разработчика: 1) MAX II; 2) Arria II GX ППВМ; 3) Arria II GX ППВМ, вариант 6G.

Первый вариант самый дешевый в представленной линейке, он стоит порядка 150\$. ПЛИС, установленная на этой плате, имеет

CPLD архитектуру. Число логических элементов составляет 1270. Это в десятки и даже сотни раз меньше, чем у ПЛИС с архитектурой FPGA. Представленные второй и третий варианты имеют FPGA архитектуру, стоят соответственно 1500\$ и 3000\$, но вмещают уже соответственно 124100 и 256000 логических элементов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Percolating SnO<sub>2</sub> nanowire network as a stable gas sensor: direct comparison of long-term performance versus SnO<sub>2</sub> nanoparticle films / V.V. Sysoev, T. Schneider, J. Goschnick, I. Kiselev et al. // Sensors and Actuators B. V. 139. 2009. PP. 699-703.
2. Оссовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Оссовский; пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2004. 344 с.
3. О возможности применения нейропроцессора для обработки отклика однокристалльной мультисенсорной микросистемы идентификации газов / В.Ю. Мусатов, В.В. Сысоев, А.А. Машенко, А.С. Варезников и др. // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2008. №1.С. 17-22.

**Машенко Артем Андреевич** –

аспирант кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

**Лашков Андрей Владимирович** –

студент Саратовского государственного технического университета

**Мусатов Вячеслав Юрьевич** –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

**Сысоев Виктор Владимирович** –

технических наук, доцент кафедры «Общая физика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 004.93; 681.77

**В.П. Глазков, И.В. Егоров, Д.В. Лачугин**

### **НЕЙРОСЕТЕВОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ О ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТАХ ТОЧЕК ПОВЕРХНОСТИ**

*Рассматривается подход к распознаванию трехмерных объектов с использованием искусственной нейронной сети прямого распространения, на основе данных о пространственных  $(x, y, z)$  координатах точек, принадлежащих поверхностям объектов. Предложена конструкция высокоскоростной стереоскопической системы технического зрения, позволяющая производить восстановление пространственных координат поверхности в режиме реального времени.*

Техническое зрение, стереоскопическая система, распознавание объектов, нейронная сеть

**V.P. Glazkov, I.V. Egorov, D.V. Lachugin**

### **NEURAL NETWORK PATTERN RECOGNITION OF THREE DIMENSIONAL OBJECTS BASED ON THE SPATIAL COORDINATES OF SURFACE POINTS**

*An approach for pattern recognition of three dimensional objects based on the spatial  $(x, y, z)$  coordinates of surface points using artificial feed-forward neural network is considered. The structure of high speed stereoscopic machine vision system with ability of operation in real time is proposed.*

Machine vision, pattern recognition, neural network

В ряде задач робототехники (управление мобильными роботами, сборочными манипуляторами, для автономной навигации объекта) возникает необходимость в распознавании объектов, находящихся перед роботом.

Процесс распознавания объектов часто состоит из следующих этапов: 1) получение изображения; 2) предварительная обработка с целью улучшения качества; 3) сегментация изображения, то есть отделение объектов от фона и от других объектов, подлежащих распознаванию; 4) построение формальной модели распознаваемого объекта; 5) сопоставление модели с набором известных эталонов и принятие решения о принадлежности к определенному классу. Наряду с формализованными алгоритмами в задачах распознавания образов успешно применяются искусственные нейронные сети, позволяющие сделать вывод о принадлежности объекта к некоторому известному классу без построения формальной модели распознаваемого образа, что полезно, когда невозможно выделить и формализовать набор признаков, характеризующих объект. Существенная особенность нейронных сетей заключается в их обучаемости, т.е. способности установить зависимость между входными и выходными данными на основе конечного множества примеров, формируемого экспериментально.

Зрительная информация об объектах заключается в различиях в яркости отдельных участках сцены и успешность распознавания зависит от степени контрастности объектов по отношению к фону и друг другу. В случае распознавания пространственных объектов, результат радикально зависит от освещения. Затененные, или наоборот, избыточно освещенные участки способны существенно исказить наблюдаемую картину, сделав распознавание трудно-осуществимым. Решение вопроса о построении системы технического зрения, инвариантной к освещенности сцены, может быть найдено в отказе от использования яркостной составляющей сцены и переходе к анализу пространственных координат точек, находящихся на поверхности распознаваемых объектов.

Предлагается использовать две последовательно включенные многослойные нейронные сети (3-5 слоев) прямого распространения с числом нейронов в каждом слое от 100 до 300. Число входов первой нейронной сети равняется  $N \times M$ , где  $N$  и  $M$  – размерность матрицы координат точек поверхности объекта по длине ( $x$ ) и ширине ( $y$ ), элементами которой являются нормализованные высоты ( $z$ ), подаваемые на вход нейронной сети. Количество выходов первой нейронной сети равняется числу известных классов объектов. Значение величины каждого выхода характеризует в первом приближении степень соответствия распознаваемого образа конкретному классу. Полученные значения уточняются с помощью второй нейронной сети, входными значениями которой служат величины на выходе первой сети.

Нормализация высот осуществляется разворотом системы координат, связанной с объектом относительно осей базовой системы координат так, чтобы ось  $Z$  базовой системы координат проходила через две наиболее удаленные точки объекта. Для надежного распознавания объекта независимо от ракурса, под которым он наблюдается, необходимо при формировании обучающего множества для нейронной сети связывать объект с 10 - 15 различными вариантами его отображения.

Вопрос об определении пространственных координат объекта и рельефа его поверхности в настоящее время находится в состоянии решения. Существенным недостатком известных методов является потребность в значительных вычислительных ресурсах, необходимых для восстановления рельефа поверхности методом корреляционного анализа изображений, полученных при помощи двух пространственно разнесенных камер. Методы восстановления трехмерного рельефа поверхности, основанные на поиске точек изображения, находящихся в фокусе, используют методы пирамид и Фурье-анализа [1], также являющиеся затратными с вычислительной точки зрения. Существуют и применяются методы анализа многофокусных изображений и выявления их морфологических свойств [2], но они требуют значительного времени для выполнения, таким образом, не могут быть применимы для опе-



ративного восстановления рельефа поверхности. Кроме этого, также являются требовательными к производительности вычислительного узла.

В связи с этим актуальной является задача разработки устройства, способного в реальном времени восстанавливать рельеф поверхности, имея ограниченную производительность вычислительного узла, сравнимую с мощностью микроконтроллера среднего семейства, а также оно должно справляться с сегментацией сцены и впоследствии принимать решения при распознавании объектов.

Предлагается осуществлять восстановление пространственных координат на основе стереоскопической системы технического зрения с лазерной подсветкой, обеспечивающей высокую помехозащищенность и независимость вычисления координат от отражающей способности поверхности. Применение лазерной подсветки представляется лучшим решением по сравнению со специальной структурной, т.к. не требует изменения структурного освещения при изменении ориентации и положения объекта.

Высокое быстродействие системы обеспечивается аппаратным способом вычисления координат пятна подсветки в локальных системах координат стереокамер, позволяющим восстановить координаты пятна подсветки синхронно с его разверткой по сцене. В результате заметно снижается вычислительная сложность, сводимая к обычным арифметическим вычислениям трехмерных координат подсвеченной точки. Таким образом, достаточной становится производительность микроконтроллера среднего семейства PIC или AVR (программный код, реализующий необходимые вычисления, также умещается в память данных МК).

Устройство состоит из двух частей: передающего блока и приёмного (рис. 1).

Передающее устройство (рис. 2) включает полупроводниковый лазер, излучающий модулированный по амплитуде луч, и систему развертки на основе зеркальной призмы, вращающейся на оси электромотора (горизонтальная развертка), и качающегося зеркала, которое осуществляет вертикальную развертку.

Приёмное устройство имеет четыре оптических преобразователя «координата пятна подсветки – код» и блок интерфейса с получателем информации. Все четыре преобразователя идентичны по конструкции и каждая пара обслуживает горизонтальную и вертикальную координаты соответственно.

Оптическая часть приёмного устройства (рис. 3) представляет двухлинзовый телескоп, преобразующий расходящийся поток лучей от удаленного объекта в параллельный поток лучей, с цилиндрической линзой, превращающей пятно подсветки произвольной формы в узкую вытянутую полосу. Данное преобразование, растягивая луч по одной координате, сохраняет его положение по другой координате, которая считывается линейкой фотоприёмников, установленной позади транспаранта с кодовой шкалой.

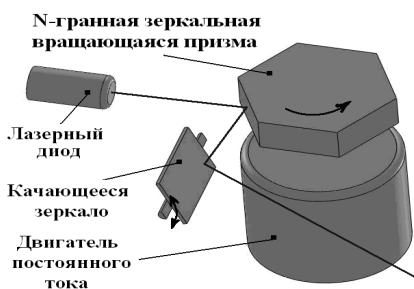


Рис. 2. Схема передающего устройства

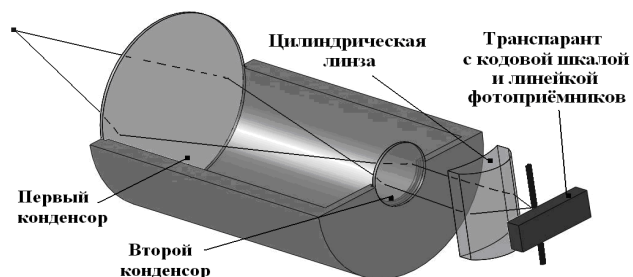


Рис. 3. Схема принимающего устройства

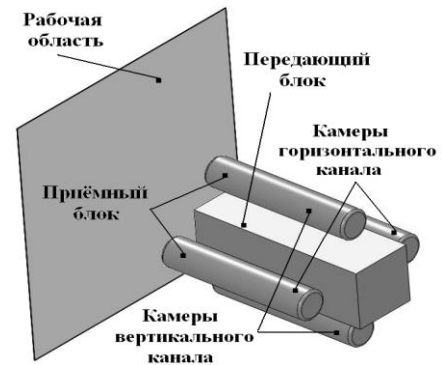


Рис. 1. Общий вид устройства

За основу предложенной оптической системы взят рефрактор Кеплера. Он дает перевернутое изображение, но это не представляет серьезных затруднений; обеспечивает расширенное поле зрения и большую яркость получаемого изображения.

Плоскость изображения представлена в виде прямоугольной пластины, которая представляет транспарант с кодовой шкалой (маска с кодом Грея), чередование прозрачных и непрозрачных участков на которой соответствует определенному коду и положению луча на плоскости данного шаблона. Расположение темных и светлых участков соответствует  $n$ -разрядному коду Грея, использование которого позволяет повысить надежность системы.

Получаемый с выходов линеек фотоприемников цифровой сигнал поступает в микроконтроллер, где производится расчет координат подсвеченной точки по формулам [3]:

$$Z = \lambda - \lambda B / (x_2 - x_1), \quad (1)$$

где  $\lambda$  – фокусное расстояние;  $x_1, x_2$  – координаты точки на изображении относительно объектива 1 и 2;  $B$  – базовое расстояние (стереобазы).

Соответственно координаты ( $X$ ) точки в пространстве вычисляются относительно системы координат первого и второго объектива по формулам:

$$X_1 = x_1(\lambda - Z) / \lambda \text{ и } X_2 = x_2(\lambda - Z) / \lambda. \quad (2)$$

На рис. 4 показана зависимость ошибки восстановления координат для семи – (а) и восьми битной (б) линейки фотоприемников при величине стереобазы (расстоянии между центрами объективов видеокамер) равной 80 мм.

Колебательный характер графиков вызван дискретностью линейки фотоприемников. Информацию о величине ошибки несет огибающая графика. При бесконечно большой разрядности процесс имеет монотонно возрастающий характер.

Из рис. 4 следует, что предлагаемая система имеет хорошую точность в пределах 1 м (при неизменной величине стереобазы). Дальнейшее расширение стереобазы для увеличения точности нецелесообразно, т.к. резко уменьшает поверхность сцены, видимую одновременно двумя камерами. Увеличение точности устройства возможно при использовании камер со скрещенными оптическими осями, что позволяет повысить точность на малых расстояниях, но сокращает глубину пространства, в котором возможно восстановление координат.

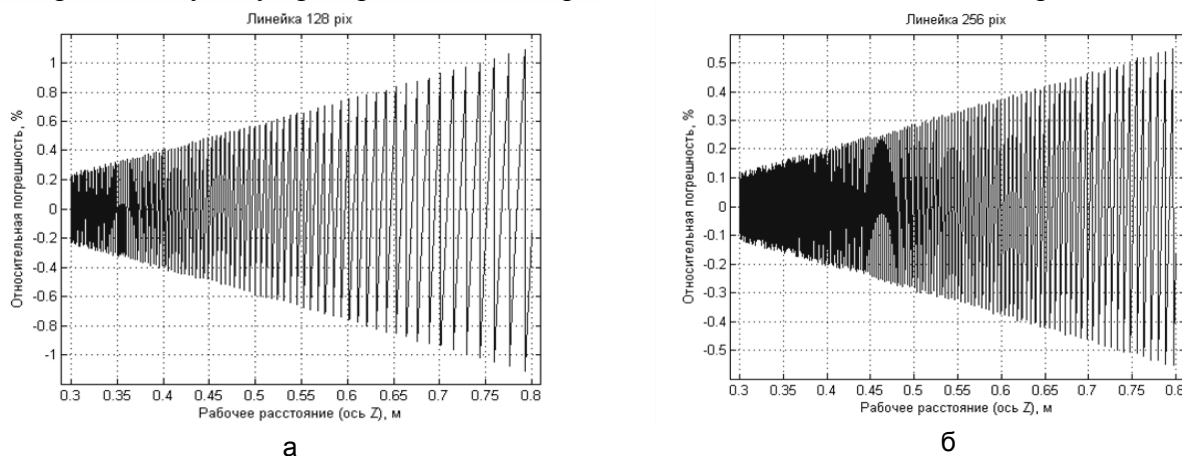


Рис. 4. Погрешность определения координаты  $Z$  при разрядности: а – 7 бит; б – 8 бит

На рис. 5 приведена схема принципа работы системы. Передающий блок устройства проводит сканирование поверхности, подсвечивая точки сцены. Отраженные лучи от каждой рассматриваемой точки воспринимаются стереоскопической системой и, проходя через систему линз, регистрируются на линейках фотоприемников. Таким образом, синхронно с разверткой подсвечивающего лазерного модулированного луча по поверхности сцены осуществляется получение двумерных координат этих точек в локальных системах координат стереокамер. На основе регистрируемых данных по формулам (1) и (2) вычисляется третья составляющая коор-

динат для каждой точки, осуществляя пространственную реконструкцию поверхности сцены. После трехмерной реконструкции картина восстанавливаемой поверхности представляет собой набор узловых точек, которые, объединяясь между собой с учетом третьей координаты (составляющей  $Z$ ), образуют сетчатые поверхности рассматриваемых объектов. В результате этого полученная картина перед стереокамерой не зависит от освещенности (затененности), от показателей яркостей и отражающей способности поверхностей.

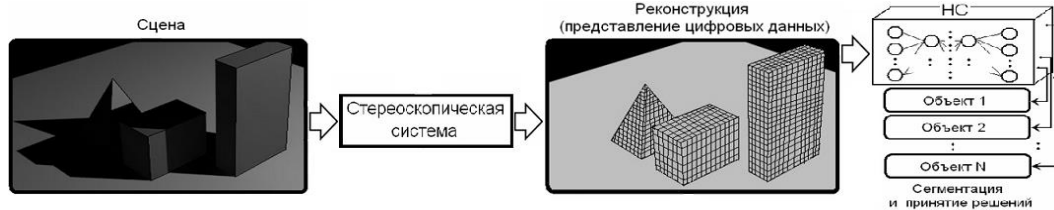


Рис. 5. Принцип работы системы

После реконструкции информация передаётся в предварительно обученную нейронную сеть, которая принимает решения о принадлежности объекта одному из классов.

#### Характеристики оптической части системы

Первый конденсор		Второй конденсор		Цилиндрическая линза	
R1, мм	20	R1, мм	20	R1, мм	-200
R2, мм	-20	R2, мм	-105	R2, мм	-18
D, мм	16,5	D, мм	11,5	d, мм	2
L, мм	3,8	L, мм	1,3	f, мм	32
$l_0$ , мм	1,2	$l_0$ , мм	0,8	$l_x$ , мм	18
f, мм	15,3	f, мм	30	$l_y$ , мм	13
Габариты (ДхШхВ), мм				115x18x18	
Диапазон рабочего расстояния, мм				300..1000	

Таким образом, к основным отличительным особенностям предложенной системы можно отнести следующие: инвариантность вычисления координат от отражающей способности поверхности, изменения яркости и освещенности; высокое быстродействие, которое обеспечивается аппаратным способом восстановления пространственных координат (за счет оптической части системы); использование нейронной сети для распознавания трехмерных объектов; автономность (устройство может быть использовано как отдельно, так и в сочетании с другими средствами оцувствления роботизированного комплекса).

Результаты моделирования показывают принципиальную работоспособность предлагаемого устройства. В табл. 1 представлены основные геометрические характеристики линз, при которых реализуются приведенные параметры всей оптической системы в целом.

Разрядность цифрового сигнала определяется размерами устройства и возможностями фокусировки луча лазера на транспаранте. Для вышеприведённых размеров системы возможные значения составляют 7 - 8 бит.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Nayar S.K. Technical Report of Computer Science Columbia University / S.K. Nayar, M. Watanabe, M. Noguchi // CUCS-028-94.
2. Захарченко А.А. Морфологические методы анализа многофокусных изображений / А.А. Захарченко // Математические методы распознавания образов : сб. докл. 12-й Всерос. конф. М.: МАКС Пресс, 2005.
3. Ту Дж. Стереоскопия / Дж. Ту, Р. Гонсалес. М.: Мир, 1978.

**Глазков Виктор Петрович –**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

**Егоров Игорь Владимирович –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

**Лачугин Дмитрий Вячеславович –**

студент Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 621.314

**А.С. Паранькина, А.В. Денисов**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ В ЗАДАЧАХ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ**

*На практике всегда имеется некоторая неопределенность, как в количественном, так и в качественном описании причин и условий в моделях причинно-следственных связей. Использован аппарат нечетких сетей Петри, позволяющий учитывать эту неопределенность. Предлагаемая методика иллюстрируется при моделировании причинно-следственных связей в проблеме качества электроэнергии.*

Причинно-следственные связи, нечеткие сети Петри, модели, силовые преобразователи частоты, качество электроэнергии

**A.S. Parankina, A.V. Denisov**

### **MODELLING OF RELATIONSHIPS OF CAUSE AND EFFECT IN PROBLEMS OF IMPROVEMENT OF QUALITY OF THE ELECTRIC POWER GENERATED BY THE CONVERTER OF FREQUENCY**

*In practice always there is some uncertainty, both in quantitative, and in the qualitative description of the reasons and conditions in models of relationships of cause and effect. In the article used apparatus of fuzzy Petri net, this make it possible take into account this uncertainty. Modelling of relationships of cause and effect in quality electricity problem illustrate proposed method.*

Relationships of cause and effect, fuzzy Petri net, model, power converters of frequency, quality of the electricity

Существующие модели причинно-следственных связей (ПСС) выполняются на основе конечных автоматов [1]. Такие модели являются строго детерминированными. В том случае, если параметры причины и условия меняются, использовать детерминированную модель нельзя, если эти изменения точно описаны и не учтены при программировании автомата.

На практике всегда имеется некоторая неопределенность, как в количественном, так и в качественном описании причин и условий. Поэтому целесообразно применить такой математический аппарат, который позволяет в определенной степени учитывать эту неопределенность ПСС. Такими свойствами обладает естественный интеллект, который часто учитывает указанную неопределенность.

В работе рассматривается нестохастическая неопределенность, которая может быть смоделирована с помощью аппарата нечеткой математики. В этой связи представляет интерес аппарат нечетких сетей Петри (НСП) [2]. Он позволяет учесть как детерминированную структурную часть ПСС, зафиксированную в структуре сети Петри, так и параметрическую и функциональную неопределенности, заложенных в ядре, которые могут быть отражены нечеткими атрибутами НСП.

Анализ нечетких сетей Петри типа  $C_f$  и  $V_f$  показывает, что наиболее простую интерпретацию при моделировании ПСС получает НСП типа  $C_f$ .

Интерпретации подлежат следующие объекты структуры НСП  $C_f$ .

#### 1. Входные позиции переходов (ВхПП).

ВхПП целесообразно интерпретировать как компонент некоторого условия или причины. При этом целесообразно данный компонент считать конъюнктом причины (или следствия). В сетях типа  $C_f$  маркер во входной позиции является нечетким, т.е. степень его наличия в позиции  $P_i$  оценивается числом  $m_i$  из диапазона  $[0,1]$ . Следовательно, соответствующий конъюнктом, равный  $m_i$ , также является нечетким.

Этим оправдывается применяемое в НСП  $C_f$  правило активации перехода, где левая часть, т.е.  $\min_{i, I(P_i, t_k) > 0} (m_i)$  – нечеткая конъюнкция нечетких величин  $m_i$ .

#### 2. Переход.

Переход реализует механизм реализации следствия при наличии причины и условия.

При этом степень принадлежности маркера в позициях причин и условий влияет на реализацию следствия через условие активности перехода посредством неравенства:

$$\min_{i, I(P_i, t_k) > 0} \{m_i\} \geq \lambda_k \quad (1)$$

Выполнение этого неравенства означает, что степень наличия всех причин и условий, влияющих на возникновение следствия, связанных с переходом  $t_k$ , достаточна.

Изменяя величину порога  $\lambda_k$ , возможно управлять степенью влияния причин и условий на следствие.

На изменение маркировок выходных позиций влияет величина значения функции принадлежности нечеткого срабатывания перехода, поэтому возникает возможность влияния важности следствия, связанного с данным переходом, на последующие причинно-следственные связи, в которых данное следствие может служить причиной или условием.

#### 3. Выходные позиции.

Формула изменения каждой выходной позиции содержит как собственную маркировку, предшествующую срабатыванию перехода, так и выходных позиций, вызвавших это срабатывание.

Способ вхождения в эту формулу компонент вектора  $f$  способствует учету степени влияния моделируемой причины на следующие ПСС.

#### 4. Компоненты вектора $\vec{f}$ .

Значения функции принадлежности нечеткого срабатывания перехода  $f_k$  интерпретируются нами, как указывалось ранее, как степень важности причин и условий, моделируемых выходными позициями, для дальнейших ПСС, определяемых, в частности, срабатыванием соответствующего перехода.

#### 5. Компоненты вектора $\vec{b}$ .

Компоненты вектора  $\vec{f}$ , т.е. пороги срабатывания переходов, позволяют моделировать различные степени выполнения следствия.

Среди всех моделей НСП в качестве базовой для использования для решения поставленной задачи выберем модель типа  $S_f$ . Однако целесообразно несколько модернизировать эту модель НСП с целью ее адаптации к рассматриваемой предметной области. Эти модернизации состоят в следующем.

5.1. Уточним формулу активации перехода. Вместо неравенства

$$\min_{i, I(P_i, t_k) > 0} \{m_i\} \geq \lambda_k, \quad (2)$$

где  $\lambda_k$  – порог срабатывания перехода  $t_k$ , проверяем конъюнкцию условий  $m_i \geq \lambda_{ki}$  для всех  $I$ , для которых  $I(P_i, t_k) > 0$ . Таким образом, вместо общего для всех входных позиций перехода  $t_k$  порога  $\lambda_k$  вводятся пороги  $\lambda_{ki}$  для каждой входной позиции  $P_i$ .

Такая модернизация оправдывается следующим образом. Если срабатывание перехода  $t_k$  интерпретировать как выполнение некоторого этапа достижения цели, а значение  $m_i$  – как количество соответствующего номеру позиции  $i$  ресурса  $R_i$ , то пороги  $\lambda_{ki}$  интерпретируются как необходимое количество этого ресурса для выполнения указанного этапа.

5.2. С целью отображения степени достижения частной цели этапа введем дополнительный вид выходной позиции  $\phi_i$ , которая после срабатывания входного для нее перехода  $t_k$  приобретает значение  $m_j^{v*} = \Phi_j(m_j^v)$ , где  $m_j^v$  определяется по основной формуле

$$(m_j = \max(m_j, \min\{m_i, f_k\})), \quad (3)$$

где  $m_j$  – старое значение маркера;  $j$  – номер той позиции, которая повлияла на срабатывание перехода  $t_k$ , функция  $\Phi_j$  имеет вид, индивидуальный для каждой позиции  $\phi_i$  и удовлетворяет общему для всех позиций условию  $0 \leq \Phi_j(m) \leq 1$  (4).

5.3. Позиция модели приобретает 2 входа и 2 выхода: прямой ( $m_i$ ) и инверсный ( $1-m_i$ ).

Соответственно, каждая позиция имеет 2 выходные стрелки с прямым значением порога срабатывания  $t_k$  ( $\lambda_{ki}^+$ ) и инверсным значением срабатывания порога  $t_k$  ( $\lambda_{ki}^-$ ).

Переход в разработанной модели ПСС состоит из 2 частей: перехода для прямых значений (верхняя незатемненная часть) и перехода для инверсных значений (темная затемненная часть). Этот переход соответственно имеет прямое значение пороговой функции ( $f_k^+$ ) и инверсное значение пороговой функции ( $f_k^-$ ).

Разработанный аппарат проиллюстрируем при моделировании причинно-следственных связей в проблеме качества электроэнергии, генерируемой силовыми преобразователями частоты (ПЧ) [3].

Анализ проблемы позволил выявить 4 основных показателя электроэнергии, наиболее значимых для ПЧ: 1) отклонения и колебания напряжения; 2) несимметрия и неуравновешенность трехфазной системы напряжения; 3) несинусоидальность формы кривой напряжения; 4) отклонения и колебания частоты.

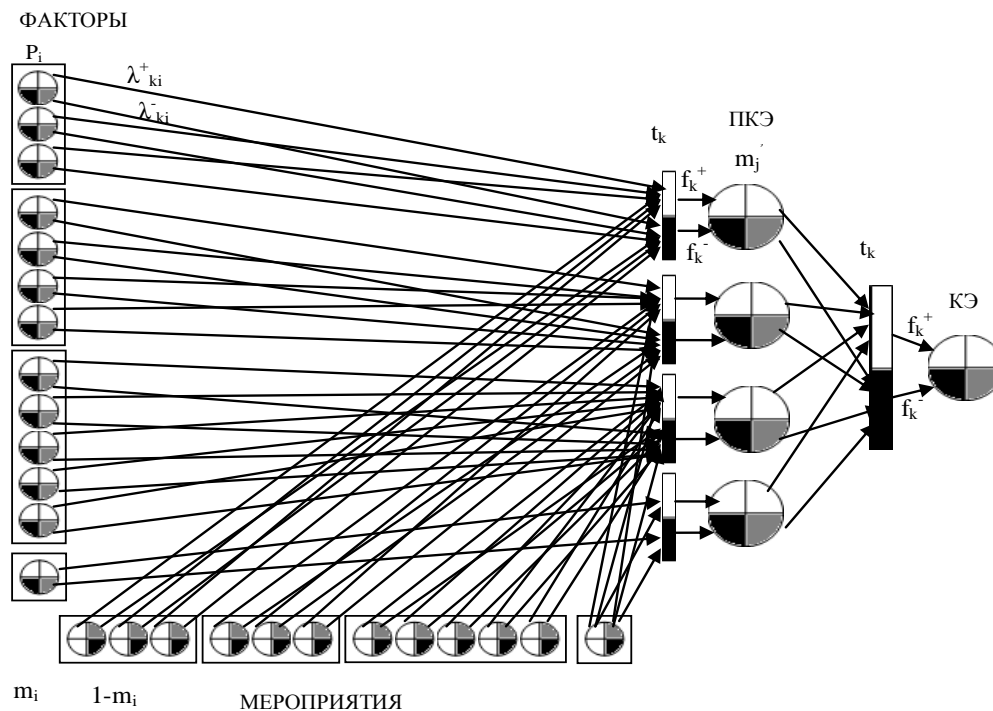
Для каждого параметра электроэнергии был выявлен список факторов, ухудшающих качество электроэнергии, генерируемой преобразователем частоты и список мероприятий влияющих на улучшение качества этой электроэнергии.

Список факторов, ухудшающих качество электроэнергии, генерируемой преобразователем частоты: 1) отклонение напряжения питания сети от номинального значения; 2) колебание величин и характера нагрузки; 3) неисправности в системе стабилизации напряжения или неправильный выбор схемы стабилизации напряжения; 4) межфазная асимметрия нагрузки; 5) неисправность конденсаторов в фазах батарей коммутирующих конденсаторов; 6) асимметрия в работе генераторов управляющих импульсов; 7) разброс в параметрах силовых вентилях или их снабберных цепей; 8) применение одномостовых или однофазно-трехфазных инверторов; 9) перегрузка инверторных трансформаторов; 9) применение импульсных компенсаторов реактивной мощности; 10) неисправности генераторов управля-

ющих импульсов; 11) нелинейность нагрузки; 12) неисправность генераторов управляющих импульсов вентилей инверторов.

Список мероприятий, влияющих на улучшение качества электроэнергии, генерируемой преобразователем частоты: 1) применение адаптивных систем стабилизации выходного напряжения; 2) применение управляемых компенсаторов избыточной реактивной мощности; 3) замена неисправных элементов системы стабилизации; 4) применение статических и управляемых симметрирующих устройств; 5) замена неисправных конденсаторов в ББК; 6) подбор параметров силовых вентилей и снабберных цепей; 7) переход к многомостовым сложным схемам инверторов; 8) применение выходных резонансных фильтров; 9) применение импульсной модуляции; 10) замена трансформаторов на более мощные; 11) применение многомостовых сложных схем компенсаторов; 12) замена генераторов управляющих импульсов.

Разработанная модель представлена на рисунке.



Модель ПСС на основе нечеткой сети Петри

В левой части схемы сети представлены позиции, соответствующие факторам, ухудшающим качество электроэнергии, генерируемой ПЧ. В нижней части модели показаны позиции, соответствующие мероприятиям, направленным на улучшение качества электроэнергии. Степень влияния факторов и мероприятий на качество электроэнергии учитывается в описанных выше параметрах переходов. Степень субъективной оценки экспертом (или экспертами) наличия данного фактора и степени выполнения данного мероприятия в конкретной ситуации закладываются в параметры исходных позиций.

Практическое использование разработанной модели может производиться в зависимости от задачи исследования по различным схемам. В частности, ее можно использовать для оценки чувствительности общего показателя качества к изменению степени наличия данного фактора или степени выполнения конкретного мероприятия. Дальнейшее развитие модели может проводиться за счет введения обратных связей между фрагментами сети. Так, очевидно, что положительное влияние некоторого мероприятия может сопровождаться усилением факторов, влияющих на ухудшение качества электроэнергии.

Предложена методика моделирования причинно-следственных связей, находящая применение в исследованиях проблем качества электроэнергии и экономии электроэнергии. Методика основана на модернизированной сети Петри типа  $S_f$ . Разработана модель ПСС для исследования проблемы качества электроэнергии, генерируемой силовыми преобразователями частоты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Резчиков А.Ф. Причинно-следственные модели производственных систем / А.Ф. Резчиков, В.А. Твердохлебов. Саратов: Изд. Центр «Наука», 2008. 137 с.
2. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
3. Голембиовский Ю.М. Управление качеством электрической энергии в сетях повышенной частоты / Ю.М. Голембиовский, Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский // Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки. Ч.5. Київ, 2002. С. 89-92.

**Паранькина Алиса Сергеевна** –

магистрант кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета

**Денисов Алексей Вячеславович**

аспирант кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 681.3

**А.А. Большаков, М.Ф. Степанов, А.М. Степанов, Ю.А. Ульянина**

#### **ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА**

*Рассматриваются вопросы построения интеллектуальной системы планирования траектории движения мобильного робота. Предлагается многоуровневая система планирования на основе представления топологии пространства в виде нейронной сети.*

Интеллектуальные роботы, нейронные сети, планирование траектории

**A.A. Bolshakov, M.F. Stepanov, A.M. Stepanov, J.A. Ulanina**

#### **PLANNING OF A TRAJECTORY OF MOVEMENT OF THE MOBILE ROBOT**

*Questions of construction of intellectual system of planning of a trajectory of movement of the mobile robot are considered. The multilevel system of planning is offered on the basis of representation of topology of space as a neural network.*

Intellectual robots, neural network, planning of a trajectory

Современные мобильные роботы способны не только выполнить команды, поступающие из центра управления, регламентирующие параметры движения (азимут, скорость, уско-



рение), но и самостоятельно планировать траекторию достижения целевого состояния, учитывая необходимость также решать задачи обхода препятствий. При этом ориентация в пространстве обеспечивается навигационной системой, использующей GPS/ГЛОНАСС, дополненной средствами системы ориентации: технического зрения, дальномером, инфракрасными датчиками и т.д. Совокупность этих средств обеспечивает мобильный робот достаточно объективной информацией о текущем местонахождении. Достижение целевого положения осуществляется по некоторой траектории, для предварительного планирования которой необходима информация о внешней среде – пространстве, в котором будет производиться движение. Эти сведения доставляет карта местности, которая может быть получена из различных источников. Однако такая карта не может учитывать возможные изменения, обусловленные перемещением мобильных устройств (транспорт, люди), природных явлений (осадки), антропогенного воздействия на ландшафт, сезонных изменений природы и др. Тем не менее общее представление о местности, доставляемое картой, вполне достаточное, для осуществления обобщённого (предварительного) планирования траектории движения.

С учётом указанных особенностей ситуации целесообразно задачу планирования действий декомпозировать на следующие уровни планирования: 1) стратегическое; 2) тактическое; 3) детальное.

Стратегическое планирование призвано построить укрупнённую схему (замысел) будущей траектории, которая будет уточнена на этапе тактического планирования с использованием актуальной информации, полученной от автономной системы ориентации.

Отличительной особенностью стратегического планирования является использование менее детальной карты местности, чем при тактическом планировании. На этом этапе в качестве препятствий могут рассматриваться достаточно большие объекты, например, здание, болото, крутой горный склон и т.д. В таких условиях размеры стратегической карты могут стать приемлемыми для осуществления планирования траектории непосредственно бортовым вычислителем, вычислительные возможности которого, разумеется, не слишком велики.

Детальность представления тактической карты определяется решаемыми задачами, а также возможностями навигационной системы, габаритами робота и т.д. На этапе детального планирования построенная траектория дополняется и сглаживается, учитывая особенности реализации транспортного механизма мобильного робота, к которым относятся, например, наименьший радиус поворота, минимальные и максимальные значения ускорения и скорости движения, максимально допустимая крутизна склона, по которому возможно движение и т.д.

Многоэтапное планирование предполагает возможность совместимости результатов работы на каждом этапе, что не каждый алгоритм планирования может обеспечить.

На этапе стратегического планирования целесообразно применять алгоритм, названный «лучевым», обеспечивающий необходимую совместимость с алгоритмами тактического планирования, например, волновые алгоритмы на базе искусственной нейронной сети [1]. Наибольшая совместимость при этом достигается в случае представления информации в полярной системе координат, наиболее естественной для автономной системы ориентации.

Рассмотрим для простоты задачу планирования траектории движения на плоскости. Пусть также в качестве внутреннего представления карты местности используется сеть с равноотстоящими узлами различной топологии (см. рис. 1).

Каждый узел сети, отражающей карту местности, снабжается координатами. При двухмерном представлении карты это декартовы координаты, помеченные на рис. 1 буквами  $x$  и  $y$ .

Пусть исходная вершина  $A$  (исходное положение мобильного робота) задаётся координатами:  $A(x_A, y_A)$ .

Пусть целевая вершина  $B$  (целевое положение мобильного робота) задаётся координатами:  $B(x_B, y_B)$ .

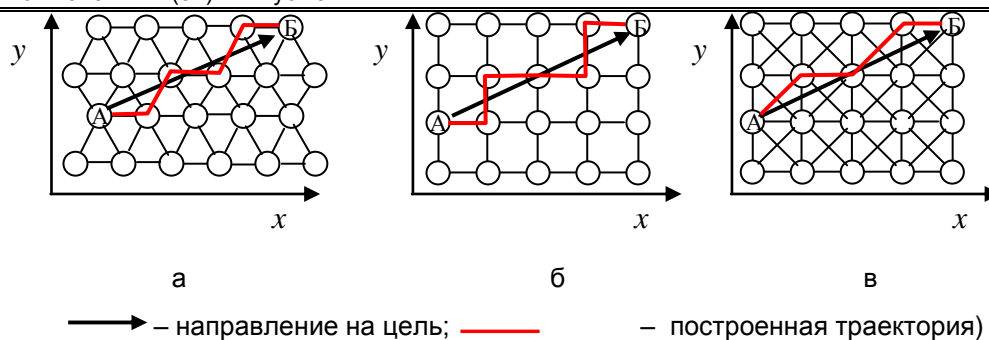


Рис. 1. Иллюстрация лучевого алгоритма (А – исходная позиция, Б – целевая позиция; с различными видами топологии сетевого представления карты местности: а – гексагональная; б – декартова; в – комбинированная

Очередную (текущую) вершину  $T$ , рассматриваемую в качестве кандидатуры для включения в искомый путь (траекторию движения) будем описывать координатами  $T(x_i, y_i)$ .

Отбор вершин сети в искомый путь из исходной вершины  $A(x_A, y_A)$  в целевую  $B(x_B, y_B)$  осуществляется в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Построение луча из исходной вершины  $A(x_A, y_A)$  в целевую  $B(x_B, y_B)$ . Луч описывается уравнением вида  $\frac{y - y_A}{y_B - y_A} = \frac{x - x_A}{x_B - x_A}$  или уравнением с угловым коэффициентом

$$y = k \cdot x + b, \quad \text{где} \quad k = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}, \quad b = y_A - k \cdot x_A \quad \text{или} \quad \text{нормированным уравнением}$$

$$x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta - p = 0, \quad \text{где} \quad \cos \theta = \frac{A}{\mu}, \quad \sin \theta = \frac{B}{\mu}, \quad p = -C \cdot \mu, \quad \mu = -\text{sign}C / \sqrt{A^2 + B^2},$$

$$A = y_B - y_A, \quad B = x_B - x_A, \quad C = y_A(x_B - x_A) - x_A(y_B - y_A).$$

2. Принять за текущую точку  $T_i(x_i, y_i)$  траектории исходную вершину А, т.е.  $x_i = x_A, y_i = y_A$ .

3. Выделить для  $T_i$  подмножество  $T_i^k$  непосредственных соседних вершин  $T_j(x_j, y_j)$ , для которых выполняются условия  $x_B - x_j < x_B - x_i, y_B - y_j < y_B - y_i$ .

4. Для каждого элемента множества  $T_i^k$  вычислить расстояние  $d_{ij}$  до луча по формуле:  $d_{ij} = x_j \cdot \cos \theta + y_j \cdot \sin \theta - p$ .

5. Выбрать среди элементов  $T_i^k$  вершину с наименьшим значением  $d_{ij}$ .

6. Если выбранная вершина является целевой вершиной, то завершить работу.

7. Иначе добавить выбранную вершину в построенный фрагмент траектории и затем принять её за текущую вершину. Идти к пункту 2 настоящего алгоритма.

На уровне тактического планирования траектории движения мобильного робота одним из наиболее перспективных направлений является использование нейросетевых алгоритмов [1]. Однако их реализация не всегда оказывается достаточно эффективной, что весьма важно, учитывая необходимость их исполнения средствами бортовых вычислителей.

В частности, предлагаемый в [1] подход базируется на применении волнового алгоритма распространения сигнала в разновидности искусственной нейронной сети Хопфилда. При этом в отсутствии препятствий алгоритм затрачивает на построение траектории  $N$  шагов, где  $N$  – количество дуг между узлами сети, которые входят в искомый путь. В силу волновой природы алгоритм гарантирует нахождение пути наименьшей длины при его наличии. Особенности функционирования автономного мобильного робота в условиях быстро меняющейся оперативной обстановки, поступления целеуказаний, изменения состояния самого мобильного робота, требуют более оперативного решения задачи планирования траектории достижения цели.

В работе нейронная сеть в виде аналоговой сети Хопфилда используется не только для хранения информации о состоянии среды (характер местности, с учётом её возможной проходимости, препятствия, целевое положение, текущее положение), в которой должен функционировать мобильный робот, как в [1], но и в качестве первичного планирования и внутреннего представления будущей траектории движения.

Концептуально нейронная сеть представляет отражение декартова представления карты местности. При этом используется разбиение пространства на ячейки, проекции которых на горизонтальную плоскость представляют собой квадраты одинакового размера. В зависимости от характера местности (твёрдое дорожное покрытие, косогор, болотистая местность, река и др.), сопоставляемой с конкретной ячейкой, последней приписывается числовая величина в диапазоне от 0.0 до 1.0, характеризующая степень проходимости данного участка местности мобильным роботом (0.0 – полностью непроходимый; 1.0 – полностью проходимый). Структурно нейронная сеть состоит из совокупности искусственных нейронов, каждый из которых сопоставляется с соответствующей ячейкой карты местности. В целях обеспечения возможности осуществления планирования траектории движения мобильного робота каждый нейрон, сопоставленный с данной ячейкой пространства, связан синаптическими связями с нейронами, сопоставляемыми с соседними ячейками пространства. В дополнение к традиционным для декартова представления горизонтальным и вертикальным связям, допускаются диагональные связи. Вводится мера длины связи. При этом длины горизонтальных и вертикальных связей условно задаются единичными, а диагональных – по теореме Пифагора, т.е.  $\sqrt{2}$ . Учитывая декартовы координаты на карте местности, а следовательно, и ортогональное представление топологии нейронной сети с декартовыми координатами нейронов-ячеек, будем описывать элементы нейронной сети (рис. 2) следующим образом:  $n$  – количество строк с ячейками на карте местности;  $m$  – количество ячеек в каждой строке карты местности;  $n_{ij}$  – искусственный нейрон, сопоставленный с  $j$ -й ячейкой, расположенной в  $i$ -й строке карты местности;  $x_{ij}$  – вектор входных сигналов нейрона  $n_{ij}$ ;  $w_{ij}$  – вектор весовых коэффициентов нейрона  $n_{ij}$ ;  $z_{ij}$  – начальные условия нейрона  $n_{ij}$ ;  $\theta_{ij}$  – смещение нейрона  $n_{ij}$ ;  $\mathcal{G}_{ij} = z_{ij} + w_{ij}x_{ij} + \theta_{ij}$  – суммарный входной сигнал нейрона  $n_{ij}$ ;  $f(\mathcal{G})$  – активационная функция нейрона  $n_{ij}$ , в качестве которой используется функция гиперболического тангенса;  $y_{ij} = f(\mathcal{G}_{ij})$  – выходной сигнал нейрона  $n_{ij}$ .

Как и всякий нейросетевой алгоритм, предлагаемый двунаправленный метод планирования существенно зависит от значений весовых коэффициентов синаптических связей нейронов сети. Исследования алгоритма осуществлялись с помощью программного средства, обеспечивающего необходимую визуализацию результатов планирования. При этом допускается гибкая настройка параметров алгоритма, а также топологии сети, размещения препятствий, исходного (рис. 3) и целевого (рис. 4) положений. Исследования алгоритма осуществлялись с помощью программного средства, обеспечивающего необходимую визуализацию результатов планирования. При этом допускается гибкая настройка параметров алгоритма, а также топологии сети, размещения препятствий, исходного и целевого положений. На рис. 5 приведён результат решения задачи планирования в условиях наличия сложных вариантов препятствий, представленных на рисунке закрашенными клетками.

Рисунок дополнен линиями, демонстрирующими построенные фрагменты траектории в прямом и обратном направлении.

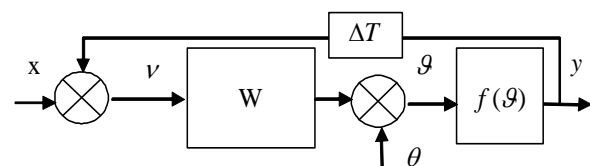


Рис. 2. Структура нейрона

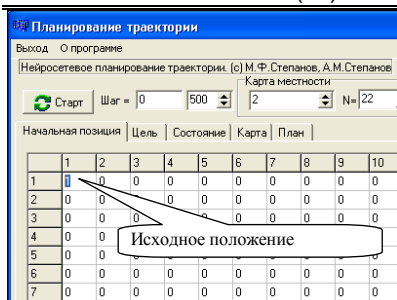


Рис. 3. Задание начальной позиции

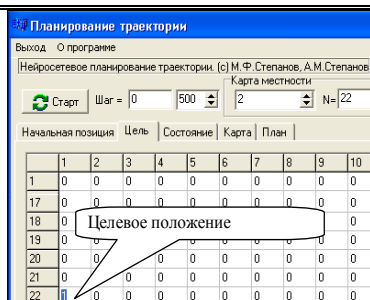


Рис. 4. Задание целевой позиции

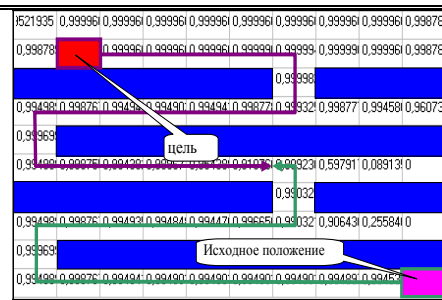


Рис. 5. Результат решения задачи двупланированием методом планирования

Встреча траекторий, как и предполагалось, осуществилась на середине планируемого пути, что, свидетельствует уменьшении требуемых шагов поиска (в два раза).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Даринцев О.В. Использование нейронной карты для планирования траектории мобильного робота / О.В. Даринцев, А.Б. Мигранов // Искусственный интеллект. 2009. № 3. С. 300 - 307.
2. Чернухин Ю.В. Нейросетевая система навигационной безопасности транспортных объектов в наземной, подводной, надводной и воздушной средах / Ю.В.Чернухин, С.Н. Писаренко, А.А. Приемко // Искусственный интеллект. 2006. № 3. С. 331-339.

**Большаков Александр Афафисьевич** –

доктор технических наук, декан факультета электронной техники и приборостроения, заведующий кафедрой «Системотехника», профессор кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

**Степанов Михаил Федорович** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Степанов Андрей Михайлович** –

аспирант кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

**Ульянина Юлия Александровна** –

студентка Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10

УДК 681.51.015: [69: 519.711.3]

**О.А. Иванникова**

### СИТУАЦИОННЫЙ ПОДХОД В СОЗДАНИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ЗДАНИЯ

*Рассматривается возможность применения ситуационного подхода для создания математической модели интеллектуального здания. Приведены общие схемы управления объектом при традиционном подходе к системе автоматического управления, а также с учетом принципов ситуационного*

управления. Указаны основные свойства интеллектуального здания как нетрадиционного объекта управления. Поставлена задача ситуационного управления и приведена схема ее решения. Сделаны выводы о целесообразности применения данного метода наряду с другими методами управления.

Математическая модель, ситуационное управление, идентификация объекта, интеллектуальное здание

**O.A. Ivannikova**

## **THE SITUATIONAL APPROACH IN CREATION OF MATHEMATICAL MODEL OF AN INTELLECTUAL BUILDING**

*Possibility of application of the situational approach for creation of mathematical model of an intellectual building is considered. The general schemes of management are resulted by object at the traditional approach in automatic control system, and also taking into account principles of situational management. The basic properties of an intellectual building as nonconventional object of management are specified. The task in view of situational management also is resulted the scheme of its decision. Conclusions are drawn on expediency of application of the given method along with other management methods.*

Mathematical model, situational management, object identification, intellectual building

Построение математической модели интеллектуального здания с распределенными параметрами позволяет оценить степень влияния этих параметров как на объект управления в целом, так и на отдельные составляющие его подсистемы, а также определить качественный и количественный состав этих параметров и их значений в разных точках объекта и моментах времени.

Проблема описания интеллектуального здания как уникального объекта управления состоит в учете в этом описании не только его специфической структуры и функционирования, но и поведения людей, возможности эволюции объекта во времени. Поэтому именно применение ситуационного подхода в создании математической модели интеллектуального здания дает возможность описывать на едином языке как объект управления и его функционирование, так и процедуру управления им.

Рассмотрим постановку задачи управления сложными объектами [1 - 2]:

1. Будем называть текущей ситуацией на объекте управления совокупность всех сведений о структуре объекта управления и его функционировании в данный момент времени и обозначать текущую ситуацию через  $Q_j$ , где  $j$  – отличительный номер ситуации.

2. Будем называть полной ситуацией на объекте управления совокупность, состоящую из текущей ситуации, знаний о состоянии системы управления в данный момент и знаний о технологии управления, и обозначать текущую ситуацию через  $S_i$ , где  $i$  – отличительный номер ситуации.

3. Пусть в распоряжении системы управления имеется  $n$  различных способов воздействия на объект управления – одношаговых решений. Каждое такое решение будем обозначать как  $U_k$ , где  $k$  – есть отличительный номер воздействия.

Таким образом, элементарный акт управления можно представить в следующем виде:

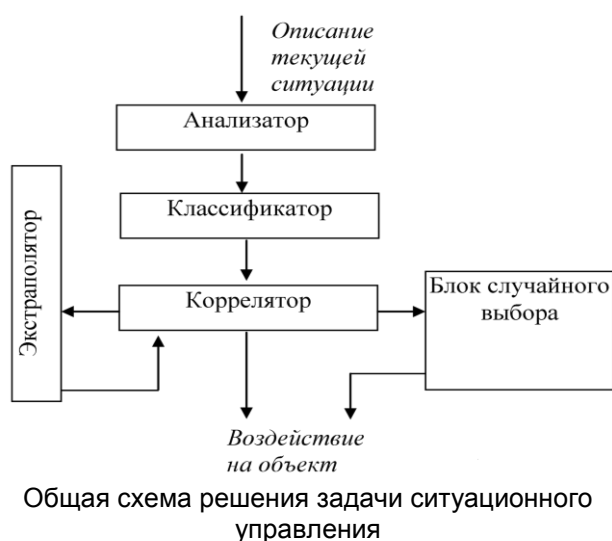
$$S_i \cdot Q_j \xrightarrow{U_k} Q_i \quad (1)$$

Данное преобразование называется корреляционным правилом, согласно которому, если на объекте управления сложилась ситуация  $Q_j$  и состояние системы управления и технологическая схема управления, определяемые  $S_i$ , допускают использование воздействия  $U_k$ , то оно применяется, и текущая ситуация  $Q_j$  превращается в новую ситуацию  $Q_i$ . Полный список таких правил задает возможность системы управления воздействовать на процессы, протекающие на объекте [1, 2].

Очевидно, что в силу конечности числа различных воздействий все множество возможных полных ситуаций распадается на  $n$  классов, каждому из которых будет соответствовать одно из возможных воздействий на объект управления, т.е. возникают процедуры классификации, которые позволяют классифицировать полные ситуации так, чтобы из них можно образовать столько классов, сколько различных одношаговых решений есть в распоряжении системы управления. Если для некоторых полных ситуаций невозможно в силу не слишком хорошего

знания как объекта, так и влияния воздействия на него, указать единственное одношаговое решение, то можно включить эту ситуацию в несколько классов.

Однако из-за такого пересечения классов возникает задача выбора того или иного решения из числа возможных для данной полной ситуации. Для осуществления подобного выбора существуют процедуры экстраполяции последствий принятия определенного решения. С их помощью можно на основании знаний об объекте управления и его функционировании заранее оценить результаты применения выбранного воздействия и сравнить полученные прогнозы для всех возможных



для данной полной ситуации воздействий.

Таким образом, с учетом применения данных процедур общая схема решения задачи управления имеет вид, приведенный на рисунке.

Описание текущей ситуации, сложившейся на объекте управления, дается на вход Анализатора. Его задача состоит в оценке сообщения и определения необходимости вмешательства системы управления в процесс, протекающий в объекте управления. Если текущая ситуация не требует такого вмешательства, то Анализатор не передает ее на дальнейшую обработку. В противном случае описание текущей ситуации поступает в Классификатор. Используя информацию, хранящуюся в нем, Классификатор относит текущую ситуацию к одному или нескольким классам, которым соответствуют одношаговые решения. Эта информация передается в Коррелятор, в котором хранятся корреляционные правила. Коррелятор определяет то правило, которое должно быть использовано. Если такое правило единственное, то оно выдается для исполнения. Если таких правил несколько, то выбор лучшего из них производится после обработки предварительных решений в Экстраполяторе, после этого Коррелятор выдает решение о воздействии на объект. Если Коррелятор или Классификатор не могут принять решение по поступившему описанию текущей ситуации, то срабатывает Блок случайного выбора и выбирается одно из воздействий, оказывающих не слишком большое влияние на объект, или система отказывается от какого-либо воздействия на объект. Это свидетельствует о том, что система управления не располагает необходимой информацией о поведении в данной ситуации [1, 2].

Фактически из-за сложности интеллектуального здания как объекта управления, исходные данные о нем и способах управления им не будут достаточно полными. Поэтому система управления таким объектом должна быть открытой. Она должна иметь возможность корректировать свои знания об объекте и методах управления им. В работе такой системы управления имеется два этапа: этап обучения и настройки и этап работы. В начальный период, когда система управления интеллектуальным зданием только создается, собираются многочисленные сведения от технологов, инженеров, хорошо знающих объект управления. С их помощью формируются классы ситуаций и корреляционные правила. Они определяют целесообразность использования определенных воздействий на объект управления в заданной ситуации. При этом мнения экспертов могут не совпадать, что приводит к попаданию ситуации в различные классы по управлению. С помощью экспертов формируются и процедуры экстраполяции, способы оценки ситуаций, исходящие из желаемого функционирования объекта управления. Это означает, что на первом этапе в проект системы закладывается значительное количество субъективной информации об объекте управления и процедурах управления им.

После этапа накопления знаний и формирования выше описанных процедур (см. рисунок), система может начинать работать. При этом число различных полных ситуаций обычно весьма велико, а число решений конечно и невелико:

$$|\{S_i\}| \gg |\{U_k\}|. \quad (2)$$

При этом, чем больше число возможных ситуаций и чем меньше число допустимых одношаговых решений, тем эффективнее будет работать схема управления, показанная на рисунке, тогда когда

$$|\{S_i\}| \approx |\{U_k\}|, \quad (3)$$

можно применить подобную схему. Хотя ее эффективность в таком случае и не будет очень высока, возможно, это единственный путь управления таким объектом [2].

Итак, ситуационный подход при создании математической модели интеллектуального здания имеет ряд особенностей:

1. Ситуационное управление требует больших затрат на создание предварительной базы сведений об объекте управления, его функционировании и способах управления им.

2. Описание ситуаций, складывающихся на объекте управления (текущих ситуаций), должно быть произведено на языке, в котором отражаются основные параметры и связи, необходимые для классификации этого описания и сопоставления ему одношагового решения по управлению. При этом необходимо правильно выбрать уровень описания, который не должен быть достаточно грубым.

3. Язык описания ситуаций должен позволять отражать в нем не только количественные факты и соотношения, характеризующие объект управления, но и качественные знания, которые не могут быть формализованы в обычном математическом смысле.

4. Классификация ситуаций, объединение их в классы при использовании одношаговых решений происходит на субъективной основе. Система суммирует знания отдельных экспертов и становится носителем коллективного опыта людей.

5. Первоначально и корреляционные правила также получаются с помощью информации, сообщаемой экспертами. Уточнение этих правил, уничтожение противоречий в них и формирование новых происходят уже в процессе эксплуатации системы. Все это верно и для правил экстраполяции и для оценки заданных текущих ситуаций.

6. Из пунктов 4, 5 вытекает вывод о том, что системы ситуационного управления не могут оптимизировать процесс управления.

7. Для многих реальных объектов управления одношаговые решения не определяют стратегии управления. В таких объектах необходимо формировать в качестве решений цепочки из одношаговых решений.

Таким образом, при создании математической модели интеллектуального здания с помощью ситуационного метода управления необходимо учитывать ряд особенностей данного метода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика / Д.А. Поспелов. М.: Наука, 1986. 285 с.
2. Кини Р.Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтение и замещения / Р.Л. Кини, Х. Райфа. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.
3. Максименко В.А. Интеллектуальные здания: автоматизация и диспетчеризация систем жизнеобеспечения здания / В.А. Максименко // АВОК. 2003. №1. С. 84. НП АВОК: С.95.
4. Табунщиков Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. М.: АВОК-ПРЕСС, 2002.
5. Табунщиков Ю.А. Энергоэффективные здания / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач, Н.В. Шилкин. М: АВОК-ПРЕСС, 2003. 200 с.

**Иванникова Олеся Александровна** –

ассистент кафедры «Вычислительная техника и электроника» института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технологического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*

УДК 004.42

**А.В. Ермаков**

#### **РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GRID-ВЫЧИСЛЕНИЙ**

*Приведен обзор современных методов обработки видеоинформации в локальных вычислительных сетях. Приведены причины перехода методов обработки видеоинформации в GRID-среду. Описаны методы GRID-вычислений, которые могут быть применены для сокращения времени обработки видеоинформации. Автором предлагается метод, объединяющий существующие подходы и повышающий их эффективность с точки зрения времени обработки и числа используемых им ресурсов.*

GRID, видеоинформация, обработка, сходство памяти, группы независимо сжатых изображений.

**A.V. Ermakov**

#### **DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF INCREASED VIDEO INFORMATION PROCESSING EFFICIENCY METHOD WITH USING OF GRID-COMPUTING**

*In article have been reviewed modern methods of video information processing in local computer networks. The reasons of video information*



*processing methods transition in a GRID-environment are explained. The methods of GRID-calculations which can be applied to a video information processing time reducing problem are described. The author has considering the method that uniting existing approaches, raising their efficiency with caring about the time of processing and amount of used resources.*

#### GRID, video information, processing, storage affinity, group of pictures

В настоящее время задачи, связанные с обработкой видеoinформации, существуют во многих сферах человеческой деятельности, например, задачи, связанные с изменением данных, отвечающих за видеоизображение (различные алгоритмы фильтрации и шумоподавления или совмещение искусственных трехмерных изображений и видеоизображений), анализ видеоизображений для получения с целью распознавания образов.

Одной из наиболее востребованных задач является модификация видеоизображений, связанная с использованием видео эффектов, анимации непосредственно в видеофайлах, которая применяется кино- и телестудиями. При этом, ежегодно происходит рост как объемов обрабатываемой информации, так и требований к качеству результирующего видеопотока. В то же время растет и производительность вычислительных узлов, которая, однако, не успевает за ростом требований к качеству обработки. Все это приводит к неприемлемым для пользователя затратам на время обработки видеофайлов.

Актуальность проблемы привела к появлению в литературе различных подходов. Одним из наиболее производительных подходов являются параллельные вычисления на суперкомпьютерных архитектурах. Однако подобные решения уникальны, дорогостоящи в организации и поддержке и, как следствие, недоступны для большинства небольших и средних компаний.

Альтернативой данному решению является подход с использованием специализированных аппаратных плат или распределенная обработка в локальных вычислительных сетях (ЛВС). Анализ этих подходов показывает, что использование плат видеообработки предпочтительнее в силу их большей производительности. Однако особого внимания заслуживает подход с использованием распределенных вычислений в ЛВС, что обусловлено их большей гибкостью, то есть их применимостью в разнообразных задачах, и возможностью свободного масштабирования вычислительной среды.

Необходимо отметить, что модели и методы, используемые существующими решениями распределенной обработки в ЛВС, развиты недостаточно. Наибольшее внимание в них уделено организации алгоритма обработки, в то время как вопросы сокращения времени обработки остаются малоизученными. К основным подходам можно отнести: параллельную обработку на уровне внутрикадрового сжатия; распределенную покадровую обработку; распределенную обработку независимо сжатых групп изображений (Group of pictures - GOP). Узким местом обработки видеoinформации в ЛВС является время передачи данных между узлами, которое ограничивает минимальное время, необходимое для завершения обработки. Решения использующие метод распределенной обработки GOP обеспечивают наименьший объем передаваемой информации. Как следствие, это решение преобладает в подходе с использованием ресурсов ЛВС.

Однако обработка в локальной вычислительной сети ограничена в возможностях масштабирования теми вычислительными узлами, которые находятся в рамках одного административного домена. Более того, во многих случаях использование более 10-15 вычислительных узлов оказывается затруднено проблемами технического характера.

Современным направлением развития распределенных вычислений, решающим все описанные выше проблемы, являются GRID-вычисления. Они обеспечивают высокую масштабируемость, используя для обработки все вычислительные узлы, доступные в GRID-среде через Интернет, и обеспечивают высокую степень независимости обработки от аппаратно-программной платформы каждого конкретного вычислительного узла.

Важной особенностью GRID-вычислений является то, что благодаря их универсальности был разработан ряд методов, позволяющих обеспечить эффективность процесса обработки с точки зрения различных её аспектов.

Распределенную обработку видеофайлов методом обработки GOP в открытой GRID-среде можно отнести к классу “data intensive” задач, или задач с большим объемом обрабатываемых данных. Среди существующих подходов наиболее развитым с точки зрения рассматриваемой задачи является метод сходства памяти (Storage affinity - SA)[1].

В его основе лежит предположение, что при обработке различных задач встречаются ситуации, когда блок данных, который необходимо передать на вычислительный узел, совпадает с тем блоком данных, который обрабатывался на этом узле ранее. В этом случае необходима передача не всего блока, а только разницы между сохранившимся после предыдущей обработки блоком, и текущим блоком данных. За счет этого сокращается объем передаваемых данных и, как следствие, общее время обработки. Использование этого метода в системе OurGrid показало хорошие результаты для различных задач.

Однако задача обработки видеоинформации обладает рядом особенностей, которые не учитываются ни методом SA, ни каким-либо другим из методов. При использовании метода распределенной обработки, в котором наименьшим обрабатываемым блоком информации является GOP, исходный видеофайл разбивается на набор видеоотрезков, равных числу GOP. При этом каждый такой отрезок снабжается служебной информацией и дополнительными кадрами, взятыми из соседних с ним групп. За счет этого объем передаваемой и обрабатываемой информации дополнительно увеличивается, что приводит к увеличению времени задержек при передаче и обработке видеоинформации, а, следовательно, и общему времени обработки. Таким образом, для сокращения времени обработки необходимо разбиение видеофайла на возможно меньшее число отрезков, что вступает в противоречие с необходимостью увеличения числа узлов. Разница между временем обработки одного видеофайла, разбитого на разное число отрезков, продемонстрирована на рис. 1, иллюстрирующем эксперимент по анализу зависимости времени обработки от числа используемых вычислительных узлов.

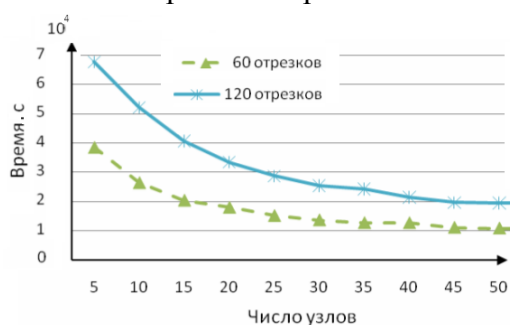


Рис. 1. Зависимость времени обработки от числа отрезков, на которые разбит видеофайл



Рис. 2. Время обработки видеоотрезка на вычислительных сайтах с различным составом вычислительных узлов

Таким образом, для задачи обработки видеоинформации в гомогенной среде достаточно выбрать максимальное число узлов  $GN$  из доступных, и выбрать число заданий  $TN$ , обеспечивающих минимальное время обработки, такое, что  $GN \leq TN$ .

В случае обработки видеоинформации на гетерогенных вычислительных узлах, которые составляют GRID-среду, появляется необходимость оценки не только количества используемых при обработке узлов, но и состава используемой вычислительной среды. Проведенный эксперимент по анализу зависимости времени обработки от состава вычислительной среды, показанный на рис. 2, демонстрирует такой случай. В этом эксперименте использовалась вычислительная среда из 12 узлов, разделенных на 4 группы каждая из которых обладает собственной производительностью. При этом в разных экспериментах наблюдается одинаковое время обработки для разного состава сайта. На рис. 2 число узлов записывается как

$G_1/G_2/G_3/G_4$ , где  $G_i$  – число узлов  $i$ -й группы, причем их производительности  $P(G_i)$  соотносятся как  $P(G_1) > P(G_2) > P(G_3) > P(G_4)$ .

Представленный график наглядно демонстрирует, что сокращение времени обработки не всегда достигается на максимальном числе наиболее производительных узлов. Рассмотренные особенности обработки видеoinформации привели к необходимости разработки учитывающего их метода, в основу которого лег принцип определения производительности и математическая модель (1), описанные в работе [2].

$$t_j = TN_n * GP_{\text{тест}} * t_{\text{тест}} + TN * t_{\text{зо}} + \frac{2 * JV * GN}{U} + TN * t_{\text{зп}} + t_{\text{сдвига}}, \quad (1)$$

где  $t_j$  – время обработки видеофайла (с);  $TN_n$  – число задач обрабатываемых  $n$ -й группой;  $GP_{\text{тест}}$  – производительность тестового узла  $n$ -й (задач в единицу времени);  $t_{\text{тест}}$  – время обработки задания тестовым узлом (сек);  $TN$  – общее число заданий;  $t_{\text{зо}}$  – задержки при обработке заданий (сек);  $JV$  – объем данных видеофайла (байт);  $GN$  – общее число узлов;  $U$  – скорость основного канала связи (б\сек);  $t_{\text{зп}}$  – задержки при передаче данных (сек);  $t_{\text{сдвига}}$  – время сдвига выполнения задания (сек).

Предложенный метод является итерационным, где определение глобального минимума осуществляется на основании предположения о его местонахождении для всех задач обработки видеoinформации, а нахождение локального минимума определяется методом координатного градиентного спуска с дроблением шага. Метод формирует план обработки, состоящий из заданий, и определяет состав целевого вычислительного сайта. При этом план представляет собой весь видеофайл, а задания являются наименьшим неделимым блоком обрабатываемых данных. Управляемыми переменными выражения (1) являются число заданий  $TN$  и число узлов  $GN$ . Метод может быть описан последовательностью из 6 шагов:

**Шаг 1.** Принимаем размер одного задания равным одному  $GOP$  и получаем  $TN$ . Принимаем число групп узлов равным единице с производительностью тестового узла. Принимаем  $GN$  равным числу узлов, имеющихся в системе.

**Шаг 2.** Определяем методом дробления такое число  $GN$ , что среднее значение  $f(GN)$  следующих за ним  $n$  точек не менее  $f(GN)$ .

**Шаг 3.** Заполняем полученное число узлов реально существующими в сети узлами.

**Шаг 4.** Определяем методом дробления минимальное  $f(GN)$  для существующих узлов.

**Шаг 5.** Определяем методом дробления минимальное  $f(TN)$ , при этом основным условием является то, что есть такое число  $X$ , что результат операции

$$TN = JK/NK * X, \quad (2)$$

является целым числом, таким образом,  $X$  – это число  $GOP$  в одном задании плана,  $JK$  – число кадров в видеоотрезке,  $NK$  – число кадров в одной группе независимо сжатых изображений рассматриваемого формата данных.

**Шаг 6.** В случае, если удалось улучшить значение  $f(GN, TN)$ , возвращаемся к шагу 4, иначе считаем, что достигнуто минимальное значение.

Для оценки степени повышения эффективности обработки видеoinформации, достигаемой при применении разработанного метода, проведен эксперимент, сравнивающий полученное при его использовании время, со временем, полученным при использовании метода SA.

На рис. 3 показаны зависимости времени обработки видеоотрезка от его длины, полученные с помощью метода SA и разработанного метода.

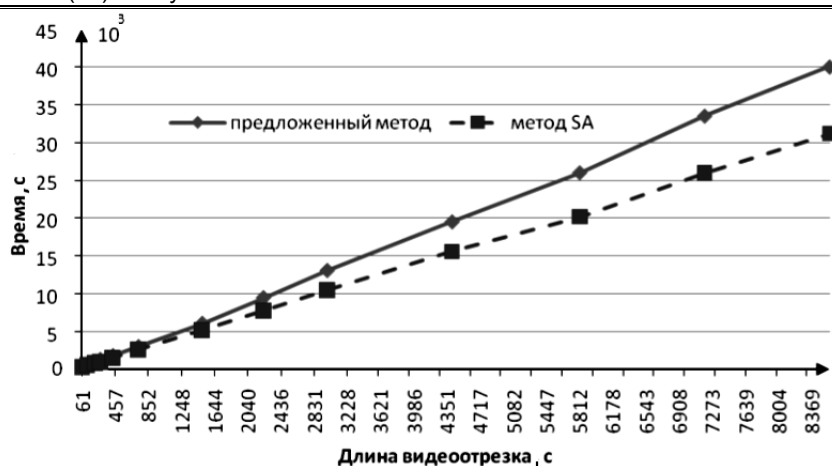


Рис. 4. Сравнительный график времени обработки видеофайла при использовании традиционного и разработанного методов

Отметим, что предлагаемый в работе метод может работать совместно с уже существующими методами, обработки в GRID-среде. Его реализация может быть легко совмещена как с методом SA, что в редких случаях может дать дополнительное увеличение производительности, так и с экономическими моделями (economy model)[3], так как позволяет гибко управлять составом вычислительной среды, а также многими другими методами. При этом разработанный метод позволяет реализовать основные особенности присущие задачам обработки видеoinформации, достигая за счет этого сокращения времени обработки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Santos-Neto, E. Exploiting Replication and Data Reuse to Efficiently Schedule Dataintensive Applications on Grids [Текст] / E. Santos-Neto, W. Cirne, F. Brasileiro, A. Lima // 10th JSSPP, 2004. P. 210-232.

2. Долинина О.Н. Обработка видеoinформации с использованием GRID-вычислений / О.Н. Долинина, А.В. Ермаков // Телематика'2010:телекоммуникации, веб-технологии, суперкомпьютинг: сб. статей участников Всерос. конкурса научных работ студентов и аспирантов. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. С. 197-203.

3. Abramson, D. A computational economy for grid computing and its implementation in the nimrod-g resource broker / D. Abramson, R. Buyya, J. Giddy // Future Generation Computer Systems. 2002. № 18:1061-1074/

**Ермаков Александр Вадимович** –  
аспирант Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.11.10, принята к опубликованию 15.11.10*