

# ВЕСТНИК

САМАРСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА  
имени академика С. П. КОРОЛЁВА  
(национального исследовательского  
университета)

№ 7 (31)

2011

ВЕСТНИК  
САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
имени академика С. П. КОРОЛЁВА  
(национального исследовательского университета)

№ 7 (31)  
2011

Тематический выпуск

*Главный редактор*

Шахматов Е. В., д.т.н., профессор

*Заместитель главного редактора*

Прокофьев А. Б., д.т.н., профессор

*Ответственный секретарь*

Прохоров А. Г., к.т.н., доцент

*Редакционная коллегия*

Астафьев В. И., д.ф.-м.н., профессор

Балакин В. Л., д.т.н., профессор

Богатырёв В. Д., д.э.н., профессор

Казанский Н. Л., д.ф.-м.н., профессор

Комаров В. А., д.т.н., профессор

Коптев А. Н., д.т.н., профессор

Кузьмичёв В. С., д.т.н., профессор

Лукачёв С. В., д.т.н., профессор

Меркулова Л. П., д.п.н., профессор

Михеев В. А., д.т.н., профессор

Пиганов М. Н., д.т.н., профессор

Прохоров С. А., д.т.н., профессор

Фалалеев С. В., д.т.н., профессор

*Редколлегия тематического выпуска*

Горячкин О. В., д.т.н., профессор

Леонович Г. И., д.т.н., профессор

Нестеров В. Н., д.т.н., профессор

Жданов А. И., д.ф.-м.н., профессор

Коптев А. Н., д.т.н., профессор

Пиганов М. Н., (ответственный редактор), д.т.н., профессор

*Председатель редакционного совета*

Сойфер В. А., член-корр. РАН

*Редакционный совет*

Аншаков Г. П., член-корр. РАН

Барвинок В. А., член-корр. РАН

Гречников Ф. В., член-корр. РАН

Кирилин А. Н., д.т.н., профессор

Шорин В. П., академик РАН

Журнал входит в утвержденный ВАК Минобрнауки РФ Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Журнал включён в общероссийский каталог ОАО «Роспечать». Подписной индекс – 18264

© Самарский государственный аэрокосмический университет  
443086, Самара, Московское шоссе, 34  
Тел.: (846) 267 48 41; электронная почта: [vest@ssau.ru](mailto:vest@ssau.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ НА МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

*Н. Д. Сёмкин, М. П. Калаев, А. М. Телегин*

9

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ ЛЕНТЫ В СТРИМЕРАХ, ДВИЖУЩЕЙСЯ НА ВИБРИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И СОВЕРШАЮЩЕЙ КОЛЕБАНИЯ В ДВУХ НАПРАВЛЕНИЯХ**

*В. П. Тарануха, К. М. Рагульскис*

17

### **ВЫЧИСЛЕНИЕ РЕШЕНИЙ РЕГУЛЯРИЗОВАННЫХ РАСШИРЕННЫХ НОРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ МЕТОДОМ LU-РАЗЛОЖЕНИЯ**

*В. В. Долишней, А. И. Жданов*

23

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛИС В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТ**

*П. И. Грушин, В. И. Логинов, Н. П. Ямпурин*

28

### **ЦИКЛИЧЕСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

*А. В. Пияков*

36

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЛЕНТЫ В СТРИМЕРАХ ПРИ НАЛИЧИИ ПЕРЕКОСА И НЕРАВНОМЕРНОСТИ СКОРОСТИ ЕЁ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ**

*В. Е. Лялин, В. П. Тарануха*

41

### **ПЫЛЕУДАРНЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНОГО СОСТАВА МИКРОМЕТЕОРИТОВ И ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА**

*И. В. Пияков, Д. В. Родин*

47

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕБИТА ЖИДКОСТИ, НЕФТИ И ГАЗА**

*К. Ю. Плесовских*

54

### **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА МИКРОСХЕМ**

*С. В. Тюлевин, А. И. Архипов, М. Н. Пиганов, С. В. Елизаров*

58

### **РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ДИЛА-ГРОУВА ОКИСЛЕНИЯ КРЕМНИЯ**

*А. А. Айзикович, Ю. П. Демаков*

64

### **ОБУЧАЮЩИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ**

*И. Ю. Шумских, С. В. Тюлевин*

69

<b>АППРОКСИМАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИНДУКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ФУНКЦИИ ГАУССА С РАЗНОСТНЫМ АРГУМЕНТОМ ПЕРВОГО ПОРЯДКА</b>	77
<i>В. С. Тиньгаев, С. А. Матюнин, В. А. Медников</i>	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ АПЕРТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН МАЛОЙ ДЛИНЫ</b>	82
<i>В. Д. Паранин, М. В. Дашков</i>	
<b>МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ</b>	87
<i>И. Н. Козлова, С. В. Тюлевин, А. В. Токарева</i>	
<b>ГАЗОВЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЛИНЕЙНОГО ИОННОГО ЗЕРКАЛА</b>	92
<i>Д. В. Родин, И. В. Пияков</i>	
<b>ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОВОДИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ</b>	97
<i>А. М. Телегин, М. П. Калаев, Н. Д. Сёмкин</i>	
<b>АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА</b>	107
<i>А. В. Костин</i>	
<b>ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА ВДОЛЬ ОСИ КАНАЛА ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ МИКРОСБОРОК</b>	113
<i>А. В. Столбиков, М. Н. Пиганов, А. В. Костин</i>	
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА С ЭЛЕМЕНТАМИ КОНСТРУКЦИИ РАДИОАППАРАТУРЫ</b>	117
<i>А. В. Костин, М. Н. Пиганов, А. В. Столбиков</i>	
<b>МУЛЬТИСЕНСОРНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ</b>	123
<i>Г. И. Леонович, С. А. Матюнин, Н. А. Ливочкина</i>	
<b>ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕРМОСТАБИЛЬНЫХ РС-СТРУКТУР С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ</b>	128
<i>А. И. Меркулов, П. В. Лактанов, В. А. Меркулов</i>	
<b>ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЛЬНОГО УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ В ТРАКТЕ УСКОРИТЕЛЯ</b>	133
<i>А. В. Пияков</i>	

<b>ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ</b>	
<i>И. Ю. Шумских</i>	139
<b>СЛЕПАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ В ВЕКТОРНОМ КАНАЛЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ</b>	
<i>А. А. Березовский, О. В. Горячкин</i>	149
<b>МЕТОДИКА УСКОРЕННЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНО МОНТИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ</b>	
<i>А. В. Наседкин</i>	153
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ</b>	
<i>А. Д. Краснощёков, С. В. Тюлевин, И. Н. Козлова, А. В. Токарева</i>	158
<b>ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ФРАНЧАЙЗИНГА В ВЫСШЕМ ОБРАЗОВАНИИ</b>	
<i>А. А. Нечитайло, С. А. Нечитайло</i>	162

## CONTENTS

<b>MODELING OF HIGH SPEED FLOW OF PARTICLES IMPACT ON MATERIALS AND STRUCTURAL ELEMENTS OF THE SPACECRAFT</b> <i>N. D. Semkin, M. P. Kalaev, A. M. Telegin</i>	9
<b>MATHEMATICAL MODEL OF FLUCTUATIONS OF THE TAPE IN STREAMERS, MOVING ON THE VIBRATING SURFACE AND MAKING TO-LEBANJA IN TWO DIRECTIONS</b> <i>V. P. Taramuha, K. M. Ragulskis</i>	17
<b>COMPUTATION OF SOLUTION REGULARIZED AUGMENTED NORMAL SYSTEMS OF EQUATION BY LU-DECOMPOSITION METHOD</b> <i>V. V. Dolishniy, A. I. Zhdanov</i>	23
<b>FPGA USING IN SYSTEMS OF AUTOMATED FREQUENCY DISTRIBUTION</b> <i>P. I. Grushin, V. I. Loginov, N. P. Yampurin</i>	28
<b>CYCLIC ACCELERATOR OF CHARGED PARTICLES</b> <i>A. V. Piyakov</i>	36
<b>MATHEMATICAL MODEL OF MOVEMENT OF THE TAPE IN STREAMERS IN THE PRESENCE OF THE WARP AND NON-UNIFORMITY OF SPEED OF ITS TRANSPORTATION</b> <i>V. E. Ljalin, V. P. Taramuha</i>	41
<b>DUST-IMPACT MASS-SPECTROMETER FOR DETERMINATION OF ELEMENTAL COMPOSITION OF MICROMETEORITES AND SPACE DEBRIS PARTICLES</b> <i>I. V. Piyakov, D. V. Rodin</i>	47
<b>INVESTIGATION OF FACTORS AFFECTING THE ACCURACY OF THE FLOW RATE OF LIQUID, OIL AND GAS</b> <i>K. Y. Plesovskikh</i>	54
<b>ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF PREDICTIVE MODELS OF QUALITY PARAMETERS OF THE CHIPS</b> <i>S. V. Tyulevin, A. I. Arhipov, M. N. Piganov, S. V. Elizarov</i>	58
<b>CALCULATION OF PARAMETERS OF THE DEAL – GROVE MODEL FOR THE OXIDATION OF SILICON</b> <i>A. A. Aizikovich, Yu. P. Demakov</i>	64
<b>TRAINING EXPERIMENT AT FORECASTING OF QUALITY AND RELIABILITY OF SOLDERED JOINTS OF ELECTRONIC ASSEMBLAGES</b> <i>I. Y. Shumskikh, S. V. Tyulevin</i>	69
<b>APPROXIMATION OF CHARACTERISTICS OF LINEAR DISPLACEMENT INDUCTIVE SENSORS USING MODIFIED GAUSSIAN FUNCTION WITH A FIRST ORDER DIFFERENCE ARGUMENT</b> <i>V. S. Tingaev, S. A. Matyunin, V. A. Mednikov</i>	77

<b>RESEARCH OF APERTURE CHARACTERISTICS OF SMALL LENGTH OPTICAL FIBERS</b>	
<i>V. D. Pararin, M. V. Dashkov</i>	82
<b>FORECASTING TECHNIQUE OF SEMICONDUCTOR DIODES QUALITY INDICATORS</b>	
<i>I. N. Kozlova, S. V. Tyulevin, A. V. Tokareva</i>	87
<b>GAS MASS SPECTROMETER WITH A NON-LINEAR ION MIRROR</b>	
<i>D. V. Rodin, I. V. Pijakov</i>	92
<b>REVIEW OF RESEARCH CONDUCTIVITY OF DIELECTRICS AND SEMICONDUCTORS UNDER HIGH PRESSURE</b>	
<i>A. M. Telegin, M. P. Kalaev, N. D. Semkin</i>	97
<b>THE ANALYSIS OF METHODS OF PROTECTION OF ONBOARD EQUIPMENT OF SPACE VEHICLES FROM INFLUENCE OF FACTORS OF THE ELECTROSTATIC DISCHARGE</b>	
<i>A. V. Kostin</i>	107
<b>BUILD-UP MATHEMATICAL MODEL OF ALLOCATION TEMPERATURE GAS ALONG AN AXIS THE CHANNEL A TORCH DISCHARGE AT INTERACTION WITH THICK-FILM DEVICES OF MICROASSAMBLY</b>	
<i>A. V. Stolbikov, M. H. Piganov, A. V. Kostin</i>	113
<b>MATHEMATICAL MODELING OF INTERACTION A HIGH-FREQUENCY TORCH DISCHARGE WITH CONSTRUCTION ELEMENTS OF RADIO EQUIPMENT</b>	
<i>A. V. Kostin, M. H. Piganov, A. V. Stolbikov</i>	117
<b>THE FIBER-OPTICAL MULTITOUCH PRESSURE TRANSDUCER</b>	
<i>G. I. Leonovich, S. A. Matjunin, N. A. Livochkina</i>	123
<b>MATHEMATICAL MODELING OF TECHNOLOGICAL PRODUCTION PROCESSOF THERMO-STABLE RESISTOR – CAPACITY STRUCTURES</b>	
<i>A. I. Merkulov, P. V. Laktanov, V. A. Merkulov</i>	128
<b>MEASUREMENTS OF THE RADIAL AND ANGULAR DISTRIBUTION OF PARTICLES IN THE ACCELERATOR TRACT</b>	
<i>A. V. Piyakov</i>	133
<b>QUALITY FORECASTING SOLDER JOINT ELECTRONIC COMPONENTS</b>	
<i>I. Y. Shumskikh</i>	139
<b>MULTICHANNEL BLIND IMAGE DECONVOLUTION ALGORITHM</b>	
<i>A. A. Berezowskii, O. V. Goryachkin</i>	149
<b>METHOD OF ACCELERATED TEST RESEARCH SOLDERED JOINTS SURFACE MOUNT DEVICES</b>	
<i>A. V. Nasedkin</i>	153

**MODELING IN MANAGEMENT SYSTEMS**

*A. D. Krasnoschekov, S. V. Tyulevin, I. A. Kozlova, A. V. Tokareva*

158

**ORGANIZATION OF THE SYSTEM FRANCHISING IN HIGHER EDUCATION**

*A. A. Nechitailo, S. A. Nechitailo*

162

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ НА МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

© 2011 Н. Д. Сёмкин, М. П. Калаев, А. М. Телегин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Воздействие микрометеороидов и частиц космического мусора на материалы и открытые элементы конструкций космических аппаратов в условиях длительной эксплуатации приводит к деградации их характеристик. Для экспериментального моделирования метеорного и техногенного воздействия на поверхности оптического стекла разработана и изготовлена установка, включающая электродинамический ускоритель, систему регистрации и обработки информации. Экспериментальный стенд позволяет решить следующие задачи:

- определение основных механизмов, приводящих к деградации материалов;
- определение экспериментальных зависимостей деградационных характеристик от массы и скорости потока частиц.

*Оптическое стекло, коэффициент пропускания, микрометеороидный поток, кратер, электродинамический ускоритель.*

### Введение

В последние годы сохраняется тенденция увеличения концентрации высокоскоростных техногенных пылевых частиц на околоземных орбитах. По некоторым данным, уже сейчас концентрация техногенных пылевых частиц в три раза превышает концентрацию микрометеороидов естественного происхождения. Учитывая все повышающиеся требования к надежности и долговечности космических аппаратов, а также появление множества новых материалов, необходимо дальнейшее развитие исследований процессов взаимодействия высокоскоростных пылевых частиц с материалами элементов конструкции космических аппаратов.

Стоит отметить, что в последнее время в космической промышленности появляются и находят применение новые материалы, что обуславливает необходимость проведения ударных экспериментов. Для имитации воздействия микрометеоритов и техногенных частиц на материалы конструкций КА, а также для создания и калибровки новых микрометеороидных датчиков существуют различные способы ускорения пылевых частиц в лабораторных условиях.

### Оборудование и методика проведения эксперимента

В [1] приведено описание конструкции и принципа действия линейного ускорителя для моделирования микрометеороидов, использующего электродинамический метод ускорения частиц. Данный ускоритель позволяет моделировать в лабораторных условиях столкновения микрометеороидов размером 0,1...10 мкм и скоростями 1...15 км/с с различными материалами.

На рис. 1 приведена структурная схема линейного ускорителя для моделирования микрометеороидов, тракт которого так же, как и у прототипа состоит из инжектора, линейного электростатического ускорителя (ЛЭСУ), линейного электродинамического ускорителя (ЛЭДУ), трёх измерительных линеек и камеры для экспериментов. Вакуум в системе обеспечивают две откачные системы, каждая из которых состоит из вакуумного диффузионного масляного агрегата АВМД - 250, форвакуумного насоса НВПР - 16 и необходимых задвижек (КВЭ-63). Предельное остаточное давление в системе составляло  $10^{-5}$  мм рт. ст..

Фотография ускорителя для моделирования микрометеороидов приведена на рис. 2. Остановимся на основных узлах тракта. В

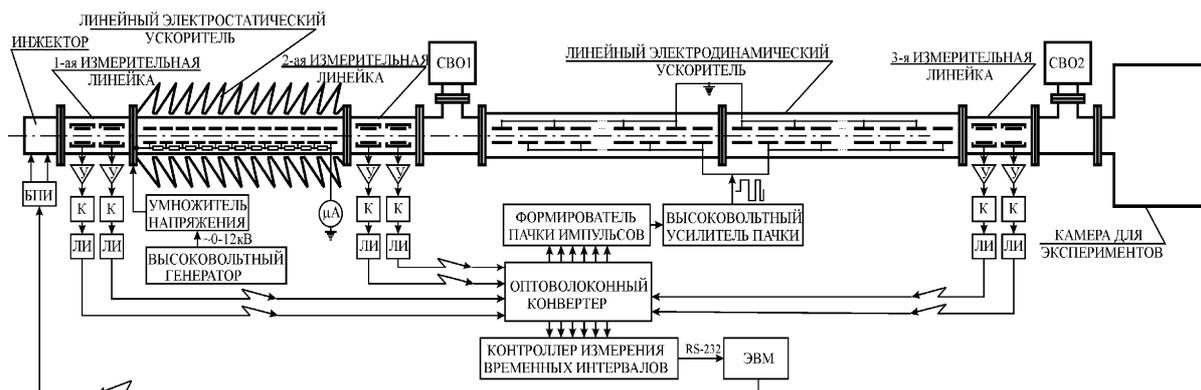


Рис. 1. Структурная схема линейного ускорителя микрометеоритов:  
 У – усилитель; К – компаратор; ЛИ – лазерный излучатель;  
 СВО1, СВО2 – система вакуумной откачки 1 и 2 соответственно; БПИ – блок питания инжектора



Рис. 2. Ускоритель для моделирования микрометеороидов

конструкцию инжектора заряженных частиц [2] не было внесено никаких изменений, так как он достаточно хорошо зарекомендовал себя при работе с различными порошками.

Однако при работе ускорителя наблюдалась неравномерность потока инжектируемых частиц. Вследствие случайных процессов, протекающих в инжекторе, а также

из-за флуктуаций напряжений на зарядном и бункерном электродах, интервалы следования между частицами не были периодическими. Это приводило к неравномерности разрядки конденсаторных батарей высоковольтного усилителя пачки, а следовательно, к потере частиц.

Иногда поток частиц был достаточно плотным даже для того, чтобы система измерения параметров частиц и формирователь пачки импульсов успевала идентифицировать каждую частицу. При работе ускорителя приходилось постоянно отслеживать интенсивность следования частиц и при необходимости регулировать напряжение на бункерном электроде. Для автоматизации данного процесса в описываемом ускорителе управление блоком питания инжектора осуществляется по оптическому каналу через последовательный порт ЭВМ. Программа, которая осуществляет сбор и предварительную статистическую обработку данных о частицах, отслеживает периодичность следования частиц и регулирует напряжения на бункерном и зарядном электродах инжектора.

### Результаты экспериментов

*Исследование кратеров после воздействия алюминиевых частиц на кварцевое стекло с нанесенной платиновой пленкой*

В ходе данного эксперимента в камеру устанавливалось кварцевое стекло, на поверхность которого была нанесена пленка из платины толщиной  $\sim 0,2$  мкм. Затем образец подвергался воздействию высокоскоростных пылевых частиц. Скорости частиц при ударе находились в диапазоне от 1 до 12 км/с. На рис.3,а приведено изображение кратера от удара низкоскоростной частицы. На рис.3,б приведена кривая, соответствующая атомарному составу на поверхности.

Как видно из рис.3,а, частица имела недостаточную скорость, чтобы полностью

испариться при ударе о поверхность кварцевого стекла. Частично материал частицы (в данном случае алюминий) находится в кратере и рядом с ним. Нахождение в зоне кратера алюминия подтверждает рис. 3,б.

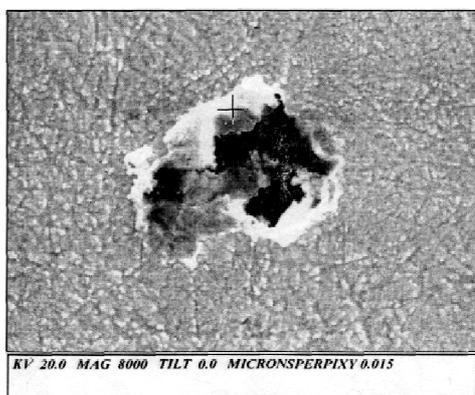
Размер полученного кратера в несколько раз больше размера частицы и зависит от скорости частицы при ударе. Наиболее вероятная скорость частиц в эксперименте составляла 5,5 км/с. Исходя из этого, можно заключить, что размер частицы для кратера на рис. 3,а составляет около 1 мкм.

Данные результаты хорошо согласуются с элементами теории механики соударения со сверхвысокими скоростями [3]. Не вдаваясь в подробности теоретических исследований, приведенных в литературе, отметим некоторые практически важные факты.

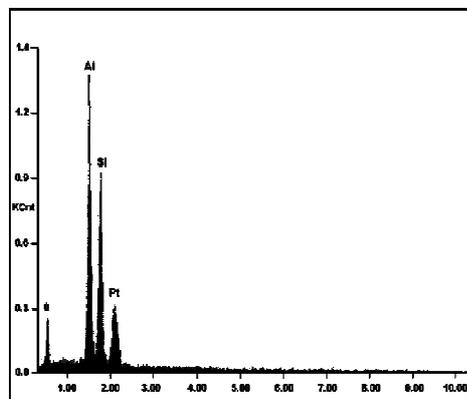
При отличии плотностей двух соударяемых материалов не более чем в два раза либо при скорости удара свыше 5 км/с, когда практически при любых материалах пар кратер при прямом ударе принимает полусферическую форму, глубину и диаметр кратера можно определить согласно следующим формулам [3]:

$$h_0 = 0,5 \left( \frac{\rho_p V_p}{\rho_s E_p} \right)^{\frac{1}{3}}, d_k \approx 2h_0, d_i \approx kd_k,$$

где  $E_p$  – удельная энергия кратерообразования,  $d_k$  – диаметр кратера,  $d_n$  – диаметр поврежденной зоны,  $k$  – коэффициент, характеризующий размер поврежденной околоратерной



а)



б)

Рис. 3. Изображение кратера на поверхности стекла (а), атомарный состав поверхности кратера (б)

зоны. Для стеклянных поверхностей  $k \approx 2,5$ .

На рис.4. приведены расчётная зависимость диаметра кратера от диаметра частицы при различных скоростях соударения (кривая 1) и экспериментальная (кривая 2), полученная при усреднении результатов многократных экспериментов.

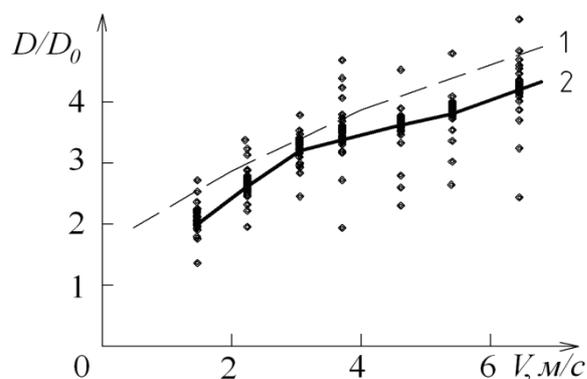


Рис. 4. Зависимость диаметра кратера от диаметра частицы при различных скоростях соударения

*Исследование кратеров после воздействия алюминиевых частиц на мишень из титана*

Методика проведения эксперимента была такой же, как и в предыдущем разделе. На рис.5,а приведена зависимость атомарного состава в области кратера на поверхности титановой мишени. На рис.5,б дано изобра-

жение кратера, полученное с помощью электронного микроскопа.

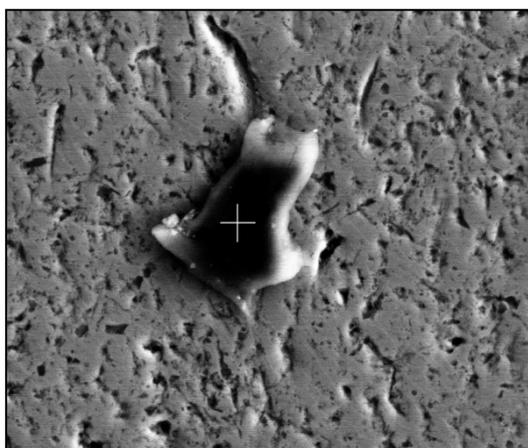
Как видно из рис.5,а, в области кратера остался материал частицы, что свидетельствует о том, что частица “застряла” в мишени. Скорость частицы в момент соударения составляла около 4 км/с.

*Исследование оптических свойств кварцевого стекла после воздействия потока алюминиевых частиц*

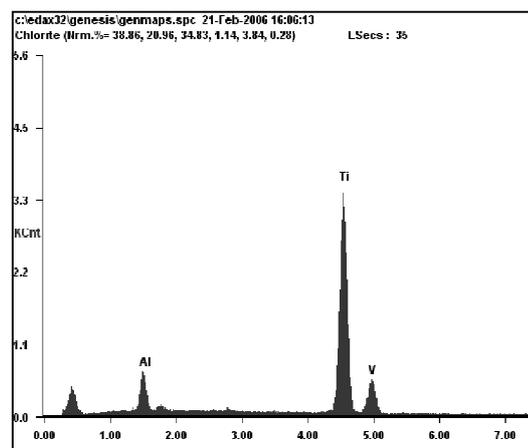
Как известно, характер рассеяния света в дисперсной среде зависит от типа неоднородностей и их расположения в пространстве. Эффективность рассеяния излучения на отдельном поверхностном дефекте, образованном в результате бомбардировки оптических элементов мелкодисперсными частицами, определяется оптическими постоянными вещества, из которого состоят эти элементы, размером дефекта, его формой, внутренней структурой и т.д. Диаметр и глубина проникновения дефекта зависят от размеров и кинетической энергии частицы, а также от физико-механических свойств материалов частицы и поверхности.

Поверхностные дефекты можно разделить на три группы:

1. Пустотелые кратеры.
2. Кратеры, заполненные (частично или полностью) материалом аэрозольной частицы или продуктами сгорания.



а)



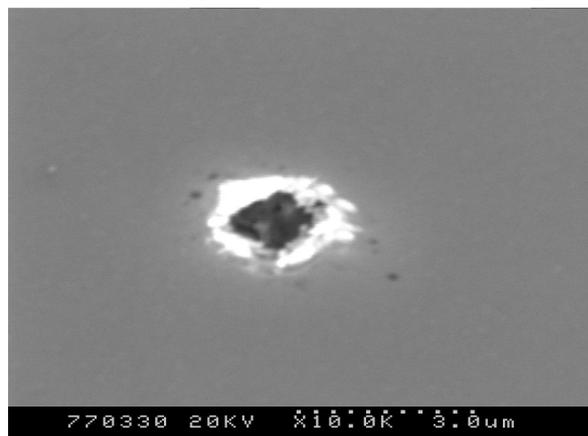
б)

Рис. 5. Изображение кратера на поверхности титана (а) и атомарный состав поверхности кратера (б)

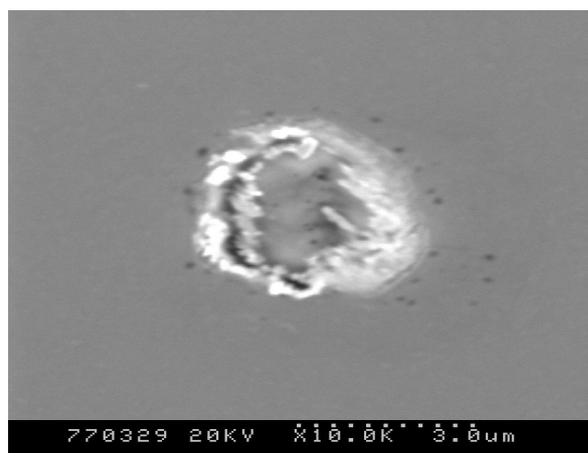
3. Пустотелые или заполненные кратеры с ореолом из микродефектов в материале оптического элемента.

Пустотелые и заполненные кратеры можно считать сферически симметричными. Так как реальные кратеры имеют размеры 2...5 мкм, то необходимо использование модели, описывающей взаимодействие видимого и ИК-диапазона с такими типами неоднородностей. С элементами теории рассеяния волн в неоднородных средах можно ознакомиться в [4].

В ходе данного эксперимента в качестве мишени использовалось оптическое стекло. Материал частиц – алюминий. На рис. 6,а приведена фотография кратера с характерным размером 2 микрона, на рис 6,б – кратер размером 4 микрона.



а)



б)

Рис. 6. Фотография кратера с характерным размером 2 мкм (а) и 4 мкм (б)

В процессе эксперимента изменялся коэффициент полного пропускания

$$K_t = \frac{F_f}{F_r},$$

где  $F_r$  и  $F_f$  - соответственно воздействующий и обратный световые потоки в зависимости от длины волны.

Исходным значением является коэффициент пропускания чистых образцов.

Коэффициент ослабления равен

$$K_s = \frac{K_{t1}}{K_{t2}},$$

где  $K_{t1}$  - коэффициент пропускания чистых образцов,  $K_{t2}$  - коэффициент пропускания после экспонирования.

Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рис. 7. В качестве источников световых волн использована матрица ярких светоизлучающих диодов с длиной волны 0,35...0,9 мкм, а также светодиод белого свечения со спектром излучения, близким к солнечному свету. Это позволяет измерить изменение характеристик во всём диапазоне длин световых волн, а также выявить специфические эффекты при размерах МДЧ, близких к длине волны источника света.

Использование двух каналов (опорного и измеряемого) с инструментальным усилителем на входе позволило свести к минимуму составляющие погрешности, вызванные изменением температуры окружающей среды и изменением свойств источников световых волн. Начальный разброс характеристик опорного и измеряемого каналов устраняется фазой калибровки, которая происходит автоматически при включении устройства.

Данные измерений и настройки устройства передаются в ЭВМ, где производится дальнейший анализ результатов. Комплекс принятых мер позволил получить точность измерения не ниже 0,02%.

Параметры частиц измеряются при помощи двух датчиков на выходе ускорителя – индукционного и ионизационного. На входе индукционного датчика установлена заземлённая экранирующая сетка, осуществляющая защиту от наводок, источником которых

является электродинамический контур ускорителя.

На рис. 8 показано изменение коэффициента полного пропускания стекла в зависимости от количества попавших на поверхность частиц для различных длин световой волны.

Также проводилось исследование прозрачности стекла при помощи спектрофотометра. На рис. 9 показано изменение коэффициента пропускания до воздействия на стекло частицами (кривая 1) и после проведения экспериментов на электродинамическом ускорителе (кривая 2).

Как видно из рис.9, в диапазоне длин волн от 500 до 870 нм, при воздействии на поверхность стекла площадью 5 см<sup>2</sup> потоком

из 3000 частиц наблюдается уменьшение коэффициента пропускания примерно на 0,7%.

Кроме того, проводилось сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчётами, полученными с использованием теории рассеяния волн в неоднородных средах [4].

С помощью разработанного прибора измерения деградации материалов под воздействием высокоскоростных пылевых частиц возможно исследование как поведения элементов конструкций КА в условиях воздействия потоков пылевых частиц, так и выполнение тарировки различных детекторов микрометеороидов и частиц космического мусора.

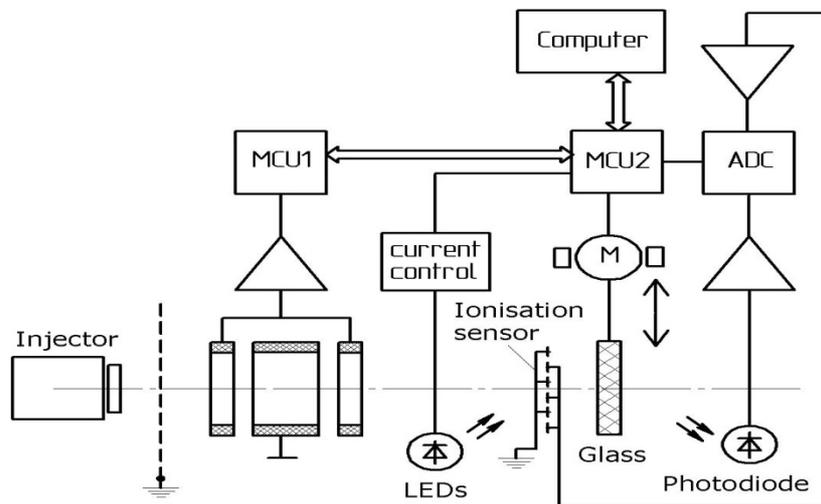


Рис. 7. Функциональная схема измерительной установки

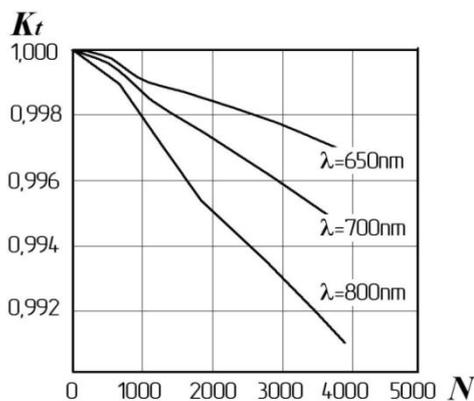


Рис. 8. Изменение коэффициента пропускания стекла в зависимости от количества частиц

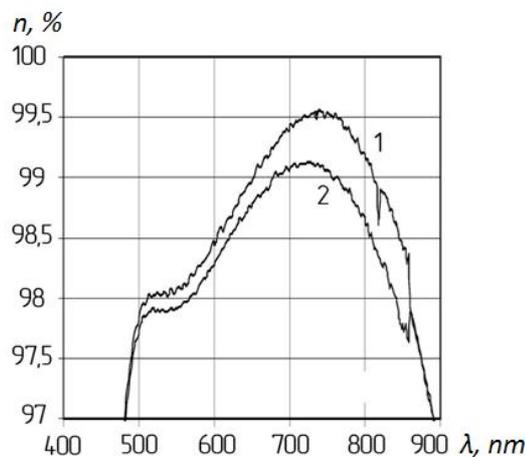


Рис. 9. Зависимость изменения коэффициента пропускания стекла от длины световой волны

### Библиографический список

1. Сёмкин, Н. Д. Линейный ускоритель для моделирования микрометеоритов [Текст] / Н. Д. Сёмкин, А. В. Пияков, К. Е. Воронов, Н. Л. Богоявленский, Д. В. Горюнов // Приборы и техника эксперимента.– 2007. - №2 – С. 140-147.

2. Сёмкин, Н. Д. Инжектор заряженных пылевых частиц [Текст] / Н. Д. Сёмкин, А. В. Пияков, К. Е. Воронов, Н. Л. Богояв-

ленский, С. М. Шепелев // Приборы и техника эксперимента.– 2006. - №3. – С. 154-159.

3. Хэллон, Ф. Механика соударения со сверхвысокими скоростями [Текст] / Ф. Хэллон, Сфифт // В кн.: Динамика удара. – М.: Мир, 1985. – 341с.

4. Исимару, А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах [Текст] / А. Исимару. – М.: Мир, 1981. – 356 с.

## MODELING OF HIGH SPEED FLOW OF PARTICLES IMPACT ON MATERIALS AND STRUCTURAL ELEMENTS OF THE SPACECRAFT

© 2011 N. D. Semkin, M. P. Kalaev, A. M. Telegin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev  
(National Research University)

The impact of micrometeoroids and space debris on materials and structural elements of the open space vehicles in long-term use leads to degradation of their characteristics. For the experimental simulation of the meteor and human impact on the surface of optical glass is designed and manufactured unit, which includes an electro-accelerator system of registering and processing information. Experimental stand allows the following tasks:

- identify the main mechanisms leading to the degradation of materials;
- determination of the experimental curves of degradation characteristics of the mass and velocity of the particles.

*Optical glass, transmittance, micro-meteoroid stream, crater, an electrodynamic accelerator.*

### Информация об авторах

**Сёмкин Николай Данилович**, директор института космического приборостроения, д.т.н, профессор кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [semkin@ssau.ru](mailto:semkin@ssau.ru). Область научных интересов: высокоскоростной удар, масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

**Калаев Михаил Павлович**, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sgau5@yandex.ru](mailto:sgau5@yandex.ru). Область научных интересов: высокоскоростной удар, космическое приборостроение.

**Телегин Алексей Михайлович**, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sgau5@yandex.ru](mailto:sgau5@yandex.ru). Область научных интересов: высокоскоростной удар, космическое приборостроение.

**Semkin Nikolay Danilovich**, director of the institute of space device engineering, doctor of technical sciences, professor, department of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [semkin@ssau.ru](mailto:semkin@ssau.ru). Sphere of scientific interests: high-speed impact, mass spectrometry, space devices development.

**Kalaev Mikhail Pavlovich**, post-graduate student of radio engineering and medical diagnostic systems department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [sgau5@yandex.ru](mailto:sgau5@yandex.ru). Sphere of scientific interests: high-speed impact, space devices development.

**Telegin Aleksey Mikhailovich**, post-graduate student of radio engineering and medical diagnostic systems department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [sgau5@yandex.ru](mailto:sgau5@yandex.ru). Sphere of scientific interests: high-speed impact, space devices development.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ ЛЕНТЫ В СТРИМЕРАХ, ДВИЖУЩЕЙСЯ НА ВИБРИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И СОВЕРШАЮЩЕЙ КОЛЕБАНИЯ В ДВУХ НАПРАВЛЕНИЯХ

© 2011 В. П. Тарануха, К. М. Рагульскис

Ижевский государственный технический университет

Составлены дифференциальные уравнения колебаний ленты, движущейся на вибрирующей поверхности, которая совершает механические колебания в двух направлениях. Эти уравнения могут быть общим случаем для описания динамики магнитной ленты, движущейся в механизмах транспортирования ленты по вибрирующей поверхности магнитной головки. Они разрешают определить параметры для создания оптимального неконтакта с одновременной компенсацией нестабильности скорости передвижения ленты.

*Колебания ленты, стримеры, механизм транспортирования ленты.*

Рассмотрим динамическую модель кинематической пары, образуемой движущейся лентой и поверхностью, совершающей вынужденные механические колебания. На рис. 1 приведена динамическая модель вибрирующей поверхности 1, которая в плоскости  $xoz$  совершает вынужденные механические колебания.

По ней движется лента 2. Поверхность 1 возбуждается механическими колебаниями от двух элементов, например пьезоэлектрических преобразователей, колебания которых часто бывают гармоническими.

Поверхность 1 с пьезоэлектрическими преобразователями можно рассматривать как систему на подвижных опорах 3, 4. В данном случае нас интересует абсолютное передвижение поверхности 1, имеющей массу  $m$ .

Пьезоэлектрические преобразователи могут возбуждаться по гармоническому закону:

$$h_{01} = A_1 \sin \omega t, \quad (1)$$

$$h_{02} = A_2 \sin(\omega t + \varphi_1). \quad (2)$$

Суммируя силы, действующие на отдельные направления возбуждающих сил, и считая, что масса магнитной головки (МГ) сосредоточена в одной точке и углы  $\alpha_1 = \alpha_2 = \beta_1 = \beta_2$ , получаем

$$m \frac{\partial^2 h_{11}}{\partial t^2} + c_1 \left( \frac{\partial h_{11}}{\partial t} - \frac{\partial h_{01}}{\partial t} \right) + k_1 (h_{11} - h_{01}) + P_0 \cos \beta_1 - F_1 \cos \alpha_1 = 0,$$

$$m \frac{\partial^2 h_{21}}{\partial t^2} + c_2 \left( \frac{\partial h_{21}}{\partial t} - \frac{\partial h_{01}}{\partial t} \right) + k_2 (h_{21} - h_{02}) + P_0 \cos \beta_2 - F_1 \cos \alpha_2 = 0,$$

где  $h_{11}, h_{21}$  – смещение массы по соответствующим направлениям возбуждения,  $m$  – масса вибрирующей поверхности,  $k_1, k_2$  – жёсткость соответствующих элементов,  $c_1, c_2$  – коэффициенты демпфирования,  $P_0$  – равнодействующая сила силы давления,  $F_1$  – равнодействующая сила трения,  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  – углы между координатными осями  $xoz$  и направлениями возмущающих сил.

Проектируя на координатные оси  $x$  и  $z$  все действующие на систему силы, получаем:

$$\begin{aligned} m \left( \frac{\partial^2 h_{11}}{\partial t^2} \cos \alpha_1 - \frac{\partial^2 h_{21}}{\partial t^2} \cos \alpha_2 \right) + c_1 \frac{\partial h_{11}}{\partial t} \cos \alpha_1 - c_2 \frac{\partial h_{21}}{\partial t} \cos \alpha_2 + \\ + k_1 h_{11} \cos \alpha_1 - k_2 h_{21} \cos \alpha_2 = c_1 \frac{\partial h_{01}}{\partial t} \cos \alpha_1 - c_2 \frac{\partial h_{02}}{\partial t} \cos \alpha_2 + \\ + k_1 h_{01} \cos \alpha_1 - k_2 h_{02} \cos \alpha_2 - P_0 \cos \beta_1 \cos \alpha_1 + P_0 \cos \beta_2 \cos \alpha_2 + \\ + F_1 (\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} m \left( \frac{\partial^2 h_{11}}{\partial t^2} \cos \beta_1 + \frac{\partial^2 h_{21}}{\partial t^2} \cos \beta_2 \right) + c_1 \frac{\partial h_{11}}{\partial t} \cos \beta_1 + c_2 \frac{\partial h_{21}}{\partial t} \cos \beta_2 + \\ + k_1 h_{11} \cos \beta_1 + k_2 h_{21} \cos \beta_2 = c_1 \frac{\partial h_{01}}{\partial t} \cos \beta_1 + c_2 \frac{\partial h_{02}}{\partial t} \cos \beta_2 + \\ + k_1 h_{01} \cos \beta_1 + k_2 h_{02} \cos \beta_2 - P_0 (\cos^2 \beta_1 + \cos^2 \beta_2) + \\ + F_1 \cos \alpha_1 \cos \beta_1 - F_1 \cos \alpha_2 \cos \beta_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнения (3, 4) описывают движение поверхности 1 при заданном законе возбуждения подвижных опор. В них равнодействующая сила давления выражается следующим образом:

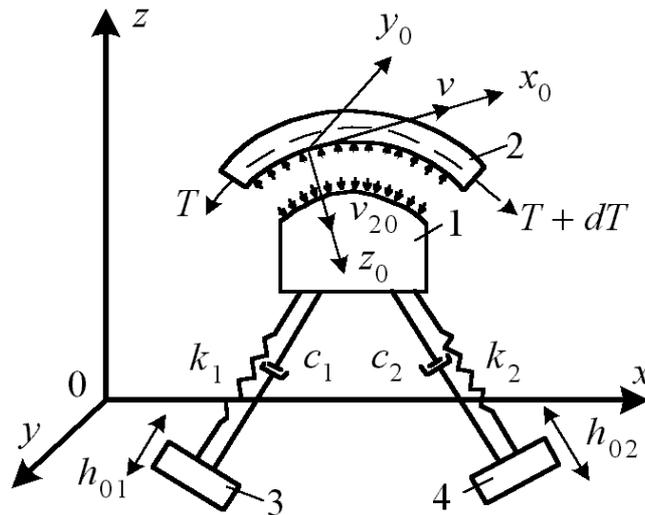


Рис. 1. Динамическая модель кинематической пары, образованной движущейся лентой и поверхностью, совершающей вынужденные механические колебания

$$P_0 = b \int_{-l/2}^{l/2} (p - p_a) dx, \tag{5}$$

где  $b$  – ширина контактной зоны ленты 2 с вибрирующей поверхностью 1;  $l$  – длина контактной зоны;  $p$  – давление ленты на вибрирующую поверхность 1;  $p_a$  – атмосферное давление.

Так как при работе механизма транспортирования ленты (МТЛ) между вибрирующей поверхностью 1 и лентой 2 создаётся постоянный неконтакт, сила трения  $F_1$  ленты 2 на поверхности 1 будет равна силе внутреннего трения в окружающей среде [1]

$$F_1 = \mu b l \frac{dU}{dz}, \tag{6}$$

где  $\mu$  – вязкость окружающей среды,  $\frac{dU}{dz}$  – градиент скорости по координате  $z$ .

Так как неконтакт между вибрирующей поверхностью 1 и лентой 2 небольшой, принимаем, что

$$\frac{dU}{dz} = \frac{(U_{x2} - U_{x1})}{h}, \tag{7}$$

где  $U_{x2}$  – скорость передвижения ленты 2 по координате  $x$ ;  $U_{x1}$  – скорость передвижения поверхности 1 по координате  $x$ ;  $h$  – расстояние между лентой 2 и вибрирующей поверхностью 1.

В данном случае уравнение (7) принимает вид:

$$F_1 = \frac{\mu \cdot b \cdot l}{h} (U_{x2} - U_{x1}). \tag{8}$$

На взаимодействующий с вибрирующей поверхностью 1 малый элемент ленты 2 будут действовать силы, показанные на рис. 2.

Уравнение поступательного передвижения элемента ленты 2 в векторном виде можно выразить следующим образом [2]:

$$m_0 \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{Q}}{\partial x_0} + \bar{q}, \tag{9}$$

где  $m_0$  – масса единицы длины ленты,  $\bar{V}$  – скорость передвижения ленты;  $\bar{Q}$  – равнодействующая сил натяжения и поперечных сил;  $\bar{q}$  – сила давления на единицу длины ленты;  $x_0, y_0, z_0$  – координаты, жёстко связанные с элементом ленты.

Когда деформация ленты рассматривается только в плоскости  $x_0, y_0, z_0$  (лента принимается плоской), в проекциях на оси, жёстко связанные с элементом ленты, получаются следующие уравнения [2]:

$$m_0 \frac{dV}{dt} - m_0 V_z \omega_y = \frac{\partial Q_{x_0}}{\partial x_0} - \frac{1}{\rho} Q_{z_0} + q_{x_0}, \tag{10}$$

$$m_0 \frac{dV_{z_0}}{dt} - m_0 V \omega_y = \frac{\partial Q_{z_0}}{\partial x_0} + \frac{1}{\rho} Q_{x_0} - q_{z_0}, \tag{11}$$

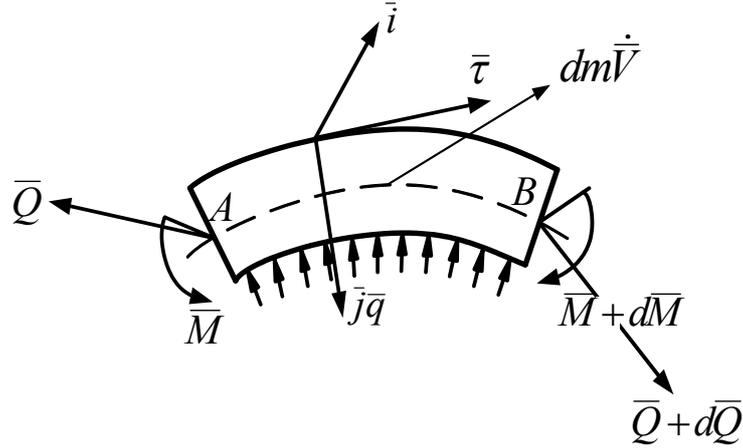


Рис. 2. Схема сил, действующих на элемент ленты, находящейся над вибрирующей поверхностью

где  $\bar{V} = V_{z_0} \bar{j} + V \bar{\tau}$ ,  $\bar{Q} = Q_{z_0} \bar{j} + Q_{x_0} \bar{\tau}$ ,

$\bar{q} = q_{z_0} \bar{j} + q_{x_0} \bar{\tau}$ ,  $\bar{\omega}_k = \omega_y \bar{i}$ ,

$\omega_k$  – угловая скорость вращения элемента ленты;  $\omega_y$  – угловая скорость вращения элемента в плоскости;  $i, \bar{j}, \bar{\tau}$  – единичные векторы.

Анализируя элемент ленты (рис. 2), определяем скорость точки  $B$  относительно  $A$ , которая в проекциях на оси  $x_0$  и  $z_0$  принимает вид [2]:

$$\frac{\partial V}{\partial x_0} - \frac{1}{\rho} V_{z_0} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial V_{z_0}}{\partial x_0} + \frac{1}{\rho} V = \omega_y. \quad (13)$$

При движении ленты 2 в МТЛ по поверхности магнитной головки угол обхвата обычно бывает малым – несколько градусов [3]. Тогда

$$V = \frac{\partial w}{\partial t}, \quad V_{z_0} = \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (14)$$

где  $w, u$  – смещения элемента ленты относительно положения равновесия.

Учитывается, что [2]

$$M = EI \frac{1}{\rho}, \quad \frac{\partial M}{\partial x_0} = -Q_{z_0}, \quad \omega_y = \frac{\partial \Delta \varphi}{\partial t}; \quad \frac{1}{\rho} = \frac{\partial \varphi}{\partial x_0},$$

$$\Delta \left( \frac{1}{\rho} \right) = \frac{\partial \Delta \varphi}{\partial x_0}, \quad (15)$$

и вводятся обозначения

$$Q_{x_0} = Q'_{x_0} + \Delta Q_{x_0}, \quad Q_{z_0} = Q'_{z_0} + \Delta Q_{z_0},$$

$$M = M' + \Delta M, \quad \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0} + \Delta \left( \frac{1}{\rho} \right), \quad (16)$$

где  $\Delta$  – означает переменную составляющую определённой величины,  $M'$  – постоянную составляющую определённой величины.

Тогда уравнения (10, 11, 12, 13) выражаются с точностью до малых величин второго порядка:

$$m_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \Delta Q_{z_0}}{\partial x_0} - \frac{1}{\rho_0} Q'_{z_0} - \frac{1}{\rho_0} \Delta Q_{z_0} - \frac{\partial \Delta \varphi}{\partial x_0} Q'_{z_0} + q_{z_0}, \quad (17)$$

$$m_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \Delta Q_{x_0}}{\partial x_0} + \frac{1}{\rho_0} Q'_{x_0} + \frac{1}{\rho_0} \Delta Q_{x_0} + \frac{\partial \Delta \varphi}{\partial x_0} Q'_{x_0} - q_{x_0}, \quad (18)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x_0} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial u}{\partial t} = 0, \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x_0} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial \Delta \varphi}{\partial t}. \quad (20)$$

Учитывая выражения (15), можно добавить уравнение, связывающее переменную составляющую поперечной силы с геометрией ленты и ее жесткостной характеристикой [2]:

$$EI \frac{\partial^2 \Delta \varphi}{\partial x_0^2} = -\Delta Q_{z_0}. \quad (21)$$

В решаемой задаче

$$Q'_{z_0} = 0, \quad Q'_{x_0} = T', \quad q_{x_0} = 0, \quad \rho_0 = R, \quad (22)$$

где  $T$  – натяжение ленты,  $R$  – радиус кривизны ленты.

Проводим некоторые преобразования и учитываем (22):

$$m_0 \frac{\partial^4 u}{\partial t^2 \partial x_0^2} + EI \frac{\partial^6 u}{\partial x_0^6} + \frac{2EI}{R^2} \frac{\partial^4 u}{\partial x_0^4} + \frac{EI}{R^4} \frac{\partial^2 u}{\partial x_0^2} - T' \frac{\partial^4 u}{\partial x_0^4} - \frac{T'}{R^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x_0^2} - \frac{m_0}{R^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 g_{z_0}}{\partial x_0^2} = 0. \quad (23)$$

Когда вибрирующая поверхность кругообразная и имеет радиус  $R$ , в общем слу-

чае в фиксированной координате  $x$  из-за вибраций ордината точки поверхности выражается следующим образом:

$$z = z_1 - \Delta z, \tag{24}$$

где

$$\Delta z = R - R \cos \mu = R \left[ 1 - \cos \left( \arcsin \frac{x_1}{R} \right) \right],$$

$$z_1 = h_{11} \cos \beta_1 + h_{21} \cos \beta_2.$$

Значение  $z_1$  известно из уравнения (4).

Если считать, что в определённый момент времени лента 2 находится на расстоянии  $h_0$  от вибрирующей поверхности, то через некоторое время данное расстояние изменится:

$$h = h_0 - u - z. \tag{25}$$

Учитывая уравнение (25), преобразуем уравнения (23 и 19):

$$-m_0 \frac{\partial^4 h}{\partial t^2 \partial x_0^2} - EI \frac{\partial^6 h}{\partial x_0^6} - \frac{2EI}{R^2} \frac{\partial^4 h}{\partial x_0^4} - \frac{EI}{R^4} \frac{\partial^2 h}{\partial x_0^2} + T' \frac{\partial^4 h}{\partial x_0^4} + \frac{T'}{R^2} \frac{\partial^2 h}{\partial x_0^2} + \frac{m_0}{R^2} \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} + \frac{m_0}{R^2} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 g_{z_0}}{\partial x_0^2} = 0, \tag{26}$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x_0} + \frac{1}{R} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{R} \frac{\partial z}{\partial t} = 0. \tag{27}$$

Дифференциальное уравнение Рейнольдса для смазочного слоя можно записать в виде [1, 4, 5]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( ph^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( ph^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 12\mu \frac{\partial ph}{\partial x} + 6\mu \frac{\partial}{\partial x} ph (U_{x_2} + U_{x_1}), \tag{28}$$

где  $U_{x_1}, U_{x_2}$  – скорости передвижения по координате  $x$  вибрирующей поверхности и ленты соответственно;  $x, y$  – координаты;  $p$  – давление;

$$U_{x_1} = \frac{\partial h_{11}}{\partial t} \cos \alpha_1 - \frac{\partial h_{21}}{\partial t} \cos \alpha_2, \tag{29}$$

$$U_{x_2} = U_x + \frac{\partial w}{\partial t}, \tag{30}$$

где  $U_x$  – средняя величина скорости передвижения ленты.

Таким образом видно, что дифференциальные уравнения (3, 4, 26, 27, 28) характеризуют динамику кинематической пары, образуемой лентой и вибрирующей поверхностью.

Введём новые безразмерные величины:

$$\begin{aligned} \frac{m}{m_g} &= m_{g_b}, & \frac{h_{11}}{h_0} &= H_{10}, & \frac{h_{21}}{h_0} &= H_{20}, & \frac{c_1}{c_0} &= c_{1_b}, & \frac{c_2}{c_0} &= c_{2_b}, & \frac{k_1}{k_0} &= K_1, & \frac{k_2}{k_0} &= K_2, \\ \frac{h_{01}}{h_0} &= H_{01}, & \frac{h_{02}}{h_0} &= H_{02}, & \frac{P_0}{P_v} &= P_b, & \frac{F_1}{P_v} &= F_{1_b}, & \omega t &= \tau, & \frac{A_1}{A_0} &= A_{1_b}, & \frac{A_2}{A_0} &= A_{2_b}, \\ \frac{T'}{T_0} &= T_b, & \frac{R}{R_0} &= R_b, & \frac{E}{E_0} &= E_b, & \frac{I}{I_0} &= I_b, & \frac{m_0}{m_v} &= m_b, & \frac{x_0}{L} &= x_{0_b}, & \frac{z}{L} &= z_b, \\ \frac{q_{z_0}}{q_0} &= q_{z_b}, & \frac{w}{L} &= w_b, & \frac{h}{\delta} &= H, & \frac{p}{p_a} &= P, & \frac{x}{L} &= x_b, & \frac{y}{L} &= \eta, \\ \frac{U_{x_1}}{U_x} &= U_1, & \frac{U_{x_2}}{U_x} &= U_2, & \frac{b}{b_0} &= b_b, & \frac{l}{L} &= l_b, \end{aligned}$$

где  $m_g$  – характерная вибрирующая масса,  $h_0$  – характерное смещение вибрирующей массы,  $c_0$  – характерный коэффициент смещения,  $k_0$  – характерная жёсткость,  $P_v$  – характерная сила давления,  $\omega$  – круговая частота колебаний,  $\tau$  – безразмерное время,  $A_0$  – характерная амплитуда колебаний,  $T_0$  – характерное натяжение ленты,  $R_0$  – характерный радиус кривизны ленты,  $E_0$  – характерный модуль упругости ленты,  $m_v$  – характерная масса ленты,  $L$  – характерная длина контакта,  $q_0$  – характерное давление на единицу длины ленты,  $b_0$  – характерная ширина контактной зоны ленты,  $\delta$  – характерный зазор между лентой и вибрирующей поверхностью,  $U_x$  – характерная скорость,  $p_a$  – атмосферное давление.

Записываем уравнения (1, 2, 3, 4, 26, 27, 28) в безразмерном виде:

$$H_{01} = \lambda_1 A_{1_b} \sin \tau, \tag{31}$$

$$H_{02} = \lambda_1 A_{2_b} \sin (\tau + \varphi_1), \tag{32}$$

$$\begin{aligned} m_{g_b} \left( \frac{\partial^2 H_{10}}{\partial \tau^2} \cos \alpha_1 - \frac{\partial^2 H_{20}}{\partial \tau^2} \cos \alpha_2 \right) + \lambda_2 c_{1_b} \frac{\partial H_{10}}{\partial \tau} \cos \alpha_1 - \\ - \lambda_2 c_{2_b} \frac{\partial H_{20}}{\partial \tau} \cos \alpha_2 + \lambda_3 K_1 H_{10} \cos \alpha_1 - \lambda_3 K_2 H_{20} \cos \alpha_2 = \\ = \lambda_2 c_{1_b} \frac{\partial H_{01}}{\partial \tau} \cos \alpha_1 - \lambda_2 c_{2_b} \frac{\partial H_{02}}{\partial \tau} \cos \alpha_2 + \lambda_3 K_1 H_{01} \cos \alpha_1 - \\ - \lambda_3 K_2 H_{02} \cos \alpha_2 - \lambda_4 P_b \cos \beta_1 \cos \alpha_1 + \lambda_4 P_b \cos \beta_2 \cos \alpha_2 + \\ + \lambda_4 F_{1_b} (\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2), \end{aligned} \tag{33}$$

$$\begin{aligned} m_{g_b} \left( \frac{\partial^2 H_{10}}{\partial \tau^2} \cos \beta_1 + \frac{\partial^2 H_{20}}{\partial \tau^2} \cos \beta_2 \right) + \lambda_2 c_{1_b} \frac{\partial H_{10}}{\partial \tau} \cos \beta_1 + \\ + \lambda_2 c_{2_b} \frac{\partial H_{20}}{\partial \tau} \cos \beta_2 + \lambda_3 K_1 H_{10} \cos \beta_1 + \lambda_3 K_2 H_{20} \cos \beta_2 = \\ = \lambda_2 c_{1_b} \frac{\partial H_{01}}{\partial \tau} \cos \beta_1 + \lambda_2 c_{2_b} \frac{\partial H_{02}}{\partial \tau} \cos \beta_2 + \lambda_3 K_1 H_{01} \cos \beta_1 + \\ + \lambda_3 K_2 H_{02} \cos \beta_2 - \lambda_4 P_b (\cos^2 \beta_1 + \cos^2 \beta_2) + \\ + \lambda_4 F_{1_b} \cos \alpha_1 \cos \beta_1 - \lambda_4 F_{1_b} \cos \alpha_2 \cos \beta_2, \end{aligned} \tag{34}$$

$$-m_b \frac{\partial^4 H}{\partial \tau^2 \partial x_b^2} - \lambda_5 E_b I_b \frac{\partial^6 H}{\partial x_b^6} - \lambda_6 \frac{2E_b I_b}{R_b^2} \frac{\partial^4 H}{\partial x_b^4} - \lambda_7 \frac{E_b I_b}{R_b^2} \frac{\partial^2 H}{\partial x_b^2} + \quad (35)$$

$$+ \lambda_8 T_b \frac{\partial^4 H}{\partial x_b^4} + \lambda_9 \frac{T_b}{R_b^2} \frac{\partial^2 H}{\partial x_b^2} + \lambda_{10} \frac{m_b}{R_b^2} \frac{\partial^2 H}{\partial \tau^2} + \lambda_{11} \frac{m_b}{R_b^2} \frac{\partial^2 z_b}{\partial \tau^2} + \lambda_{12} \frac{\partial^2 g_{z_b}}{\partial x_b^2} = 0, \quad (36)$$

$$\frac{\partial^2 w_b}{\partial \tau \partial x_b} + \lambda_{13} \frac{1}{R_b} \frac{\partial H}{\partial \tau} + \lambda_{14} \frac{1}{R_b} \frac{\partial z_b}{\partial \tau} = 0, \quad (37)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_b} \left( PH^3 \frac{\partial P}{\partial x_b} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( PH^3 \frac{\partial P}{\partial \eta} \right) = \lambda_{15} \frac{\partial PH}{\partial \tau} + \lambda_{16} \frac{\partial PH}{\partial x_b} (U_1 + U_2). \quad (37)$$

Из уравнений (5, 8, 24, 29, 30) видно, что

$$z_b = \lambda_{17} (H_{10} \cos \beta_1 + H_{20} \cos \beta_2) - \lambda_{18} R_b \left\{ 1 - \cos \arcsin \left[ \frac{\lambda_{19} (H_{10} \cos \alpha_1 - H_{20} \cos \alpha_2)}{R_b} \right] \right\}, \quad (38)$$

$$F_{1_b} = \lambda_{20} \frac{b_b L_b}{H} (U_2 - U_1), \quad (39)$$

$$U_1 = \lambda_{21} \left( \frac{\partial H_{10}}{\partial \tau} \cos \alpha_1 - \frac{\partial H_{20}}{\partial \tau} \cos \alpha_2 \right), \quad (40)$$

$$U_2 = 1 + \lambda_{22} \frac{\partial w_b}{\partial \tau}, \quad (41)$$

$$P = \lambda_{23} \frac{q_{z_b}}{b_b} + 1, \quad (42)$$

$$P_b = \lambda_{24} b_b \int_{x_{1_b}}^{x_{2_b}} (P - 1) dx_b. \quad (43)$$

Коэффициенты  $\lambda_1 \div \lambda_{24}$  являются также безразмерными. Их определяем из уравнений (1, 2, 3, 4, 5, 8, 24, 26, 27, 28), введя безразмерные величины:

$$\lambda_1 = \frac{A_0}{h_0}, \quad \lambda_2 = \frac{c_0}{\omega m_g}, \quad \lambda_3 = \frac{k_0}{m_g \omega^2}, \quad \lambda_4 = \frac{P_v}{m_g h_0 \omega^2}, \quad \lambda_5 = \frac{E_0 I_0}{m_g \omega^2 L^4},$$

$$\lambda_6 = \frac{E_0 I_0}{m_g R_0^2 L^2 \omega^2}, \quad \lambda_7 = \frac{E_0 I_0}{R_0^4 m_g \omega^2}, \quad \lambda_8 = \frac{T_0}{m_g L^2 \omega^2}, \quad \lambda_9 = \frac{T_0}{R_0^2 m_g \omega^2},$$

$$\lambda_{10} = \frac{L^2}{R_0^2}, \quad \lambda_{11} = \frac{L^3}{R_0^3 \delta}, \quad \lambda_{12} = \frac{q_0}{m_g \delta \omega^2}, \quad \lambda_{13} = \frac{\delta}{R_0}, \quad \lambda_{14} = \frac{L}{R_0},$$

$$\lambda_{15} = 12 m \omega^2 \frac{L^2}{P_a \delta^2}, \quad \lambda_{16} = 6 \mu L U_x \frac{1}{P_a \delta^2}, \quad \lambda_{17} = \frac{h_0}{L}, \quad \lambda_{18} = \frac{R}{L},$$

$$\lambda_{19} = \frac{h_0}{R_0}, \quad \lambda_{20} = \frac{U_x \mu b_0 L}{\delta P_v}, \quad \lambda_{21} = \frac{\omega h_0}{U_x}, \quad \lambda_{22} = \frac{\omega L}{U_x}, \quad \lambda_{23} = \frac{q_0}{b_0 P_a}, \quad \lambda_{24} = \frac{p_a b_0 L}{P_v}.$$

Таким образом, уравнения (33)...(37), являющиеся динамическими уравнениями кинематической пары, образуемой движущейся лентой и поверхностью, совершающей вынужденные механические колебания, представлены в безразмерном виде.

Из уравнений видно, что, подбирая фазовый угол  $\varphi_1$ , амплитуду возмущения  $A_{1_b}$ ,  $A_{2_b}$ , можно между вибрирующей поверхностью и движущейся на ней лентой создать оптимальный неконтакт с одновременной компенсацией нестабильности скорости передвижения ленты. При возрастании амплитуды относительной скорости ленты на вибрирующей поверхности возрастает величина неконтакта.

### Библиографический список

1. Галиуллин, А. С. Аналитическая динамика: Учеб. пособие [Текст] / А. С. Галиуллин. – М.: Высшая школа, 1989. – 264 с.
2. Светлицкий, В. А. Сборник задач по теории колебаний [Текст] / В. А. Светлицкий, И. В. Стасенко. – М.: Высшая школа, 1973.
3. Алекна, А. А. Методы и приборы для измерения колебаний магнитных лент [Текст] / А. А. Алекна, К. М. Рагульскис. – Каунасский политехн. ин-т, Каунас, 1980. – 135с. Деп. в ЛитНИИТИ 16 апреля 1980, № 543-80.
4. Сергеев, С. И. Основы динамики вибрирующих опор. Динамика гибких роторов [Текст] / С. И. Сергеев. – М.: Наука, 1972.
5. Норенков, И. П. Телекоммуникационные технологии и сети [Текст] / И. П. Норенков, В. А. Трудоношин. – М.: Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2000. – 248 с.

## MATHEMATICAL MODEL OF FLUCTUATIONS OF THE TAPE IN STREAMERS, MOVING ON THE VIBRATING SURFACE AND MAKING TO-LEBANIIJA IN TWO DIRECTIONS

© 2011 V. P. Taranuha, K. M. Ragulskis

Izhevsk state technical university

Differential equation of oscillations of the tape, which moves on a vibrating surface, which makes the mechanical vibrations in two directions. These equations can be the general case to describe the dynamics of magnetic tape, which moves in the mechanisms of transport of tape on the vibrating surface of a magnetic head. They are allowed to define the parameters for an optimal non-contact with simultaneous compensation of instability of strip movement speed.

*Tape fluctuations, streamers, the mechanism of tape transportation.*

### Информация об авторах

**Тарануха Владимир Прокофьевич**, заведующий кафедрой конструирования радиоэлектронной аппаратуры, к.т.н., доцент, Ижевский государственный технический университет. E-mail: [velyalin@mail.ru](mailto:velyalin@mail.ru). Область научных интересов: системы и устройства хранения данных.

**Рагульскис Казимерас Микалович**, профессор кафедры мехатронных систем, член-корр. РАН, д.т.н., профессор, Ижевский государственный технический университет. E-mail: [velyalin@mail.ru](mailto:velyalin@mail.ru). Область научных интересов: машиностроение и вибрационная техника.

**Taranukha Vladimir Prokofevich**, chair design of electronic equipment Ph.D., associate professor, Izhevsk state technical university. E-mail: [velyalin@mail.ru](mailto:velyalin@mail.ru). Research interests: systems and storage devices.

**Ragulskis Kazimieras Mikalovich**, professor of mechatronic systems department, the corresponding member academy of sciences, professor, Izhevsk state technical university. E-mail: [velyalin@mail.ru](mailto:velyalin@mail.ru). Research interests: Engineering and Vibration Engineering.

## ВЫЧИСЛЕНИЕ РЕШЕНИЙ РЕГУЛЯРИЗОВАННЫХ РАСШИРЕННЫХ НОРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ МЕТОДОМ LU-РАЗЛОЖЕНИЯ

© 2011 В. В. Долишний, А. И. Жданов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Проводится сравнительный анализ трёх подходов к вычислению решений стандартной задачи регуляризации Тихонова: на основе нормальной системы уравнений, сингулярного разложения и расширенной нормальной системы. Сравнение проводится на следующих классах задач: совместные определённые системы с плохо обусловленной матрицей, системы, в которых вектор правой части задан с погрешностью, и системы неполного машинного ранга.

*Расширенные регуляризованные нормальные системы уравнений, регуляризация Тихонова, плохо обусловленные линейные алгебраические системы.*

### Введение

Рассмотрим стандартную задачу регуляризации Тихонова:

$$\Omega(x, \alpha) = \|Ax - b\|^2 + \alpha \|x\|^2 \rightarrow \min,$$

представляющую нахождение регуляризованного решения системы уравнений

$$Ax = b, \quad (1)$$

где  $A \in R^{m \times n}$ ,  $b \in R^m$ ,  $m \geq n$ ,  $\alpha > 0$  - параметр регуляризации,  $\|\cdot\|$  - евклидова векторная норма.

Известно, что задача о минимизации сглаживающего функционала Тихонова  $\Omega(x, \alpha)$  может быть сведена к нормальной системе уравнений (или уравнению Эйлера):

$$(A^T A + \alpha E)x = A^T b. \quad (2)$$

Решение системы (2) называют регуляризованным псевдорешением системы (1).

Рассмотрим три основных способа получения регуляризованного псевдорешения системы (1):

- на основе нормальной системы уравнений (2);
- на основе сингулярного разложения матрицы системы  $A$  [1];
- на основе расширенной регуляризованной нормальной системы [2].

В данной работе дан сравнительный анализ этих трёх методов для различных классов задач. Метод, использующий сингулярное разложение, описан, например, в [1].

Для решения системы нормальных уравнений использовано разложение Холесского, так как матрица системы (2) является симметричной положительно определённой при любом  $\alpha > 0$ . В работе используется расширенная регуляризованная система нормальных уравнений, предложенная в [2], которая имеет вид:

$$\begin{pmatrix} \omega E_m & A \\ A^T & -\omega E_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $E_m$ ,  $E_n$  - единичные матрицы порядка соответственно  $m$  и  $n$ , параметр регуляризации  $\omega = \sqrt{\alpha}$ .

Достоинством расширенной регуляризованной нормальной системы (3) является то, что

$$\kappa_2(\tilde{A}_\omega) = \left( \frac{\delta_{\max} + \omega^2}{\delta_{\min} + \omega^2} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \kappa_2(A^T A + \omega^2 E) \right)^{\frac{1}{2}},$$

где  $\kappa_2(A)$  - спектральное число обусловленности матрицы  $A$ ,  $\delta_{\max}(A)$ ,  $\delta_{\min}(A)$  - соответственно максимальное и минимальное сингулярные числа матрицы  $A$ ,  $\tilde{A}_\omega$  - матрица системы (3) [2].

Для решения системы (3) используются подходы на основе трёх матричных разложений:  $LU$ ,  $QR$  (на основе отражений Хаусхолдера) и  $LDL^T$ . Последнее представляет собой модификацию разложения Холесского

для законоопределённых матриц, которая описана в [3].

**Численный эксперимент**

Рассмотрим линейные системы с возмущением в векторе правой части.

Первая группа тестов представляет собой решение следующей системы:

$$Ax = b_{true} + \xi,$$

где  $b_{true}$  - точное значение правой части,  $\xi$  - возмущения вектора правой части.

Подразумевается, что при отсутствии погрешности правой части  $\xi$  данная система совместна и имеет единственное решение, однако наличие погрешности делает её несовместной. Матрица системы  $A$  плохо обусловлена, поэтому для повышения точности нахождения псевдорешения системы требуется регуляризация.

*1. Восстановление одномерного сигнала*

Матрица  $A$  и вектор  $x$  получаются путём дискретизации на интервале

$$-\frac{\pi}{2} \leq s, t \leq \frac{\pi}{2} \text{ функций:}$$

$$\alpha(s, t) = (\cos(s) + \cos(t)) \left( \frac{\sin(u)}{u} \right)^2,$$

$$u = \pi(\sin(s) + \sin(t)),$$

$$x(t) = 2e^{-6(t-0,8)^2} + e^{-2(t+0,5)^2},$$

вектор правой части  $b_{true} = Ax$ .

Относительная погрешность решений, полученных рассматриваемыми численными алгоритмами, для этой задачи при размерности матрицы  $A$ , равной 64, и уровне шума 0,05, приведена в табл. 1. Число обусловленности матрицы системы  $cond(A) = 1,217 \times 10^{19}$ .

*2. Интегральное уравнение Фредгольма первого рода*

Матрица  $A$  и векторы  $b_{true}$  и  $x$  получены дискретизацией интегрального уравнения Фредгольма первого рода:

$$b(s) = \int_{-6}^6 \alpha(s, t)x(t)dt,$$

где  $\alpha(s, t) = \begin{cases} 1 + \cos\left(\frac{\pi(s-t)}{3}\right), & |s-t| < 3, \\ 0, & |s-t| \geq 3, \end{cases}$

$$x(t) = \begin{cases} 1 + \cos\left(\frac{\pi t}{3}\right), & |t| < 3, \\ 0, & |t| \geq 3, \end{cases}$$

$$b(s) = (6 - |s|) \left( 1 + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi s}{3}\right) \right) + \frac{9}{2\pi} \sin\left(\frac{\pi|s|}{3}\right).$$

Результаты, полученные для этого тестового примера при размере матрицы  $A$ , равной 32, и уровне шума 0,1, представлены в табл. 2. Число обусловленности матрицы системы  $cond(A) = 2,6669 \times 10^4$ .

**Системы с плохо обусловленной матрицей**

Рассмотрим систему с матрицей Гильберта. Данная система будет совместной и определённой, однако плохая обусловленность матрицы системы не позволяет решить её напрямую. Относительная погрешность решений, полученная для матрицы Гильберта порядка 32, приведена в табл.3.

Число обусловленности матрицы системы  $cond(A) = 1,4542 \times 10^{20}$ .

**Линейные системы с матрицей неполного машинного ранга**

Третий класс тестовых задач будет содержать систему, матрица которой имеет неполный машинный ранг [4].

Рассмотрим следующую несовместную систему линейных уравнений, заданную своей матрицей  $A$  и вектором правой части  $b$ :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1,00000001 \\ 1 & 1,00000002 & 1 \end{pmatrix} \in R^{4 \times 3},$$

$$b = \begin{pmatrix} -94 \\ 106 \\ 6,00000003 \\ 6,00000004 \end{pmatrix} \in R^4. \tag{4}$$

Точное псевдорешение такой системы уравнений  $\bar{x} = (1,2,3)^T$ . Решения, полученные рассматриваемыми численными алгоритмами, и их относительные погрешности приведены в табл. 4.

Таблица 1. Относительная погрешность решений задачи восстановления одномерного сигнала при уровне шума 0,05, размерность матрицы 64

$\alpha$	Нормальная система	SVD-метод	Нормальная расширенная система, $LU$	Нормальная расширенная система, $QR$	Нормальная расширенная система, $LDL^T$
10	0,9506	0,9506	0,9506	0,9506	0,9506
5	0,8440	0,8440	0,8440	0,8440	0,8440
1	0,3887	0,3887	0,3887	0,3887	0,3887
0,5	0,2471	0,2471	0,2471	0,2471	0,2471
0,1	0,1908	0,1908	0,1908	0,1908	0,1908
0,05	0,2927	0,2927	0,2927	0,2927	0,2927
0,01	0,9904	0,9904	0,9904	0,9904	0,9904
0,005	2,5029	2,5029	2,5029	2,5029	2,5029

Таблица 2. Относительная погрешность решений уравнения Фредгольма первого рода при уровне шума 0,1, размерность матрицы 32

$\alpha$	Нормальная система	SVD-метод	Нормальная расширенная система, $LU$	Нормальная расширенная система, $QR$	Нормальная расширенная система, $LDL^T$
10	0,7985	0,7985	0,7985	0,7985	0,7985
5	0,5371	0,5371	0,5371	0,5371	0,5370
1	0,0837	0,0837	0,0837	0,0837	0,0827
0,5	0,1451	0,1451	0,1451	0,1451	0,1457
0,1	0,7971	0,7971	0,7971	0,7971	0,7699
0,05	1,6539	1,6539	1,6539	1,6539	1,7003
0,01	15,2092	15,2092	15,2092	15,2092	14,7956
0,005	29,9268	29,9268	29,9268	29,9268	29,4448

Таблица 3. Относительная погрешность решений системы с матрицей Гильберта порядка 32

$\alpha$	Нормальная система	SVD-метод	Нормальная расширенная система, $LU$	Нормальная расширенная система, $QR$	Нормальная расширенная система, $LDL^T$
10	$9,7658 \times 10^{-1}$	$9,7658 \times 10^{-1}$	$9,7658 \times 10^{-1}$	$9,7658 \times 10^{-1}$	$9,7658 \times 10^{-1}$
1	$5,3739 \times 10^{-1}$	$5,3739 \times 10^{-1}$	$5,3739 \times 10^{-1}$	$5,3739 \times 10^{-1}$	$5,3739 \times 10^{-1}$
$10^{-1}$	$1,6232 \times 10^{-1}$	$1,6232 \times 10^{-1}$	$1,6232 \times 10^{-1}$	$1,6232 \times 10^{-1}$	$1,6232 \times 10^{-1}$
$10^{-3}$	$1,4947 \times 10^{-2}$	$1,4947 \times 10^{-2}$	$1,4947 \times 10^{-2}$	$1,4947 \times 10^{-2}$	$1,4947 \times 10^{-2}$
$10^{-5}$	$1,4485 \times 10^{-3}$	$1,4487 \times 10^{-3}$	$1,4487 \times 10^{-3}$	$1,4487 \times 10^{-3}$	$2,0262 \times 10^{-1}$
$10^{-7}$	$3,6381 \times 10^{-2}$	$1,4105 \times 10^{-4}$	$1,4105 \times 10^{-4}$	$1,4105 \times 10^{-4}$	$1,7678 \times 10^{-1}$
$10^{-9}$	-	$1,7387 \times 10^{-5}$	$1,7408 \times 10^{-5}$	$1,7374 \times 10^{-5}$	$1,7678 \times 10^{-1}$
$10^{-11}$	-	$4,5851 \times 10^{-6}$	$6,9798 \times 10^{-6}$	$2,5407 \times 10^{-5}$	$1,7678 \times 10^{-1}$
$10^{-13}$	-	$3,5864 \times 10^{-4}$	$6,0532 \times 10^{-4}$	$3,0973 \times 10^{-3}$	$2,5000 \times 10^{-1}$
$10^{-15}$	-	$7,6580 \times 10^{-3}$	$2,8558 \times 10^{-2}$	$2,7948 \times 10^{-1}$	$2,5151 \times 10^{-1}$

Таблица 4. Решения и их относительная погрешность для задачи неполного машинного ранга (3)

$\alpha$	Нормальная система	SVD-метод	Нормальная расширенная система, $LU$	Нормальная расширенная система, $QR$	Нормальная расширенная система, $LDL^T$
$10^{-1}$	$3,7797 \times 10^{-1}$	$3,7797 \times 10^{-1}$	$3,7797 \times 10^{-1}$	$3,7797 \times 10^{-1}$	$3,7797 \times 10^{-1}$
$10^{-3}$	$3,7796 \times 10^{-1}$	$3,7796 \times 10^{-1}$	$3,7796 \times 10^{-1}$	$3,7796 \times 10^{-1}$	$3,7796 \times 10^{-1}$
$10^{-5}$	$3,7795 \times 10^{-1}$	$3,7785 \times 10^{-1}$	$3,7796 \times 10^{-1}$	$3,7796 \times 10^{-1}$	$3,7796 \times 10^{-1}$
$10^{-7}$	$3,0878 \times 10^{-1}$	$7,9533 \times 10^{-1}$	$3,7669 \times 10^{-1}$	$4,0816 \times 10^{-1}$	$3,9187 \times 10^{-1}$
$10^{-9}$	-	$3,3507 \times 10^2$	$1,1194 \times 10^{-2}$	$1,4162 \times 10^3$	$5,7586 \times 10^{-1}$
$10^{-11}$	-	$3,4531 \times 10^2$	$8,8793 \times 10^{-7}$	$1,5246 \times 10^5$	$5,9669 \times 10^{-5}$
$10^{-13}$	-	$3,4531 \times 10^2$	$8,3925 \times 10^{-10}$	$1,1333 \times 10^7$	$7,2989 \times 10^{-7}$
$10^{-15}$	-	$3,4531 \times 10^2$	$8,3925 \times 10^{-10}$	$7,6146 \times 10^7$	$7,2988 \times 10^{-7}$
$10^{-17}$	-	$3,4531 \times 10^2$	$8,3925 \times 10^{-10}$	$4,0846 \times 10^9$	$7,1634 \times 10^{-7}$
$10^{-19}$	-	$3,4531 \times 10^2$	$8,3925 \times 10^{-10}$	$3,8796 \times 10^9$	$9,2317 \times 10^{-9}$
$10^{-21}$	-	$3,4531 \times 10^2$	$8,3925 \times 10^{-10}$	$3,8776 \times 10^9$	$7,1634 \times 10^{-7}$

#### Анализ полученных результатов и основные выводы

Полученные результаты численных экспериментов показывают, что использование регуляризованных расширенных нормальных систем позволяет расширить класс решаемых задач. Так, в примере (4) для задачи с матрицей неполного машинного ранга решение удалось получить только с использованием регуляризованных расширенных нормальных систем.

Для решения расширенных нормальных систем вида (3) наиболее стабильные по точности результаты показал метод, основанный на  $LU$ -разложении. При этом использовались стандартные подпрограммы из пакета Matlab.

Следует также отметить, что решение систем линейных алгебраических уравнений при помощи  $LU$ -разложения является широко используемым, и в настоящее время существует большое число стандартных пакетов и подпрограмм, реализующих его, в

том числе для векторных и параллельных компьютеров.

#### Библиографический список

1. Chung J., Nagy J. G., O'Leary D. P. Aweighted-GCV method for Lanczos-hybrid regularization // Electronic Transactions on Numerical Analysis. 2008. Vol. 28. 149-167 p.
2. Жданов, А. И. Об одном численно устойчивом алгоритме решения систем линейных алгебраических уравнений неполного ранга [Текст] / А. И. Жданов // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2008. № 1(16). - С. 149-153.
3. Голуб, Дж. Матричные вычисления [Текст] / Дж. Голуб, Ван Лоун Ч. - М.: Мир, 1999. - 548 с.
4. Жданов, А. И. Введение в методы решения некорректных задач [Текст]: учеб. пособие / А. И. Жданов. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. - 87 с.

# COMPUTATION OF SOLUTION REGULARIZED AUGMENTED NORMAL SYSTEMS OF EQUATION BY LU-DECOMPOSITION METHOD

© 2011 V. V. Dolishniy, A. I. Zhdanov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The article presents a comparative analysis of three approaches to the calculation of standard solutions for the Tikhonov regularization problem: Based on the normal system of equations, singular value decomposition and extended the normal system. Comparison is carried out in these classes of problem: joint defined systems with ill-conditioned matrix, systems in which the right-side vector is set with an inaccuracy and the system of deficient engine rank.

*Augmented regularized normal systems of equation, Tikhonov regularization, ill-conditioned linear algebraic systems.*

## Информация об авторах

**Жданов Александр Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [ZhdanovAleksan@yandex.ru](mailto:ZhdanovAleksan@yandex.ru). Область научных интересов: вычислительная математика, матричные вычисления.

**Долишний Василий Владимирович**, аспирант кафедры прикладной математики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [VDolishniy@mail.ru](mailto:VDolishniy@mail.ru). Область научных интересов: вычислительная математика, матричные вычисления.

**Zhdanov Alexander Ivanovitch**, doctor of physical and mathematical science, professor, head of the chair of applied mathematics, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [ZhdanovAleksan@yandex.ru](mailto:ZhdanovAleksan@yandex.ru). Area of research: computing mathematics, matrix computations.

**Dolishniy Vasily Vladimirovitch**, post-graduate student of the applied mathematics department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [VDolishniy@mail.ru](mailto:VDolishniy@mail.ru). Area of research: computing mathematics, matrix computations.

УДК 621.378

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛИС В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТ

© 2011 П. И. Грушин<sup>1</sup>, В. И. Логинов<sup>2</sup>, Н. П. Ямпурин<sup>1</sup><sup>1</sup>Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р. Е. Алексеева<sup>2</sup>Волжская государственная академии водного транспорта

Приводятся алгоритмы расчёта комбинационных составляющих при нелинейном преобразовании частоты на основе рядов Фарея. Рассмотрены подходы, не использующие синтез всего ряда Фарея, позволяющие решать задачи «пораженности» комбинационными частотами преобразователей частоты только на основе синтеза ближайших компонент к рабочим частотам исследуемых систем нелинейного преобразования частот. Предложены методы нахождения параметров комбинационных помех, прямые которых проходят через «поражённые» точки. Доказано, что область номограммы, свободная от комбинационных помех, является четырёхугольником.

*Преобразование частоты, комбинационные составляющие, цепные дроби, ряд Фарея.*

Одной из важных задач при проектировании и анализе поведения систем нелинейного преобразования частот является уменьшение влияния комбинационных гармоник на полезный сигнал.

Для решения подобных задач широко используются графические [1-3], аналитические [4, 5] и алгоритмические методы [1, 6, 7]. Одним из эффективных методов расчёта комбинационных составляющих при нелинейном преобразовании частоты являются методы на основе рядов Фарея [6, 7].

Предлагаются эффективные методы и алгоритмы решения задач анализа ближайших комбинационных частот. Основу предлагаемых методов составляет отыскание заданного соотношения смешиваемых частот преобразователя в базисе дробей Фарея с помощью аппарата цепных дробей и процедуры, в основе которой лежит базовая теорема Фарея-Коши, связывающая соседние дроби в ряде Фарея.

Цель работы - разработать эффективные методы анализа комбинационных составляющих и получить для них уравнения прямых, проходящих через найденные «поражённые» точки.

Рассмотрим задачу отыскания ближайшей дроби Фарея  $R/Q$  к заданному соотношению смешиваемых частот  $q=f1/f2$  ( $f1 \leq f2$ ), минуя операцию синтеза всей последовательности Фарея [8].

### Использование цепных дробей

Согласно теореме Дирихле теории диофантовых приближений [9] для заданного  $q$  всегда существует такая дробь  $R/Q$ , что разность между ними может удовлетворять любой наперед заданной точности. Последовательность дробей Фарея  $\Phi_k$  является последовательностью всех несократимых рациональных дробей, у которых знаменатель  $Q \leq k$ , где  $k$  – порядок ряда Фарея, поэтому для отыскания приближения заданного соотношения  $q$  дробью Фарея можно использовать аппарат цепных дробей [10].

Представим заданное соотношение смешиваемых частот  $q \in (0, 1)$  конечной цепной дробью

$$q = [b_0; b_1, b_2, \dots, b_n]. \quad (1)$$

Цепные дроби обладают тремя замечательными свойствами:

1. Любая подходящая дробь  $R_j/Q_j$  цепной дроби (1) является несократимой дробью ( $j \in 1, n$ ).

2. Знаменатель подходящей дроби, согласно [10], растет как показательная функция от индекса  $j$  подходящей дроби

$$Q_j = 2^{j-1}. \quad (2)$$

3. Рекуррентность в определении подходящих дробей:

$$\begin{aligned} R_j &= b_j R_{j-1} + R_{j-2}; \\ Q_j &= b_j Q_{j-1} + Q_{j-2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$j \geq 1, R_{-1} = 1, Q_{-1} = 0;$$

$$R_0 = b_0, Q_0 = 1.$$

Из свойства 1 можно сделать вывод, что любая подходящая дробь  $R_j/Q_j$  цепной дроби (1), являющейся приближением действительного числа  $q \in (0, 1)$ , принадлежит последовательности Фарея. Таким образом, задача отыскания приближения в базисе дробей Фарея состоит в разложении  $q$  в цепную дробь (1) [8, 10] с одновременным вычислением подходящих дробей  $R_j/Q_j$  согласно (3). Разложение числа  $q$  заканчивается, когда не будет выполняться условие

$$Q_j \leq k. \quad (4)$$

При этом подходящая дробь  $R_j/Q_j$  и есть найденная ближайшая дробь Фарея  $R_i/Q_i$ ,  $i \in I, N_k$  [8] к  $q$ .

На рис. 1 приведена структурная схема алгоритма приближения  $q$  дробью Фарея. Максимальное количество итераций алго-

ритма на рис. 1 можно определить из (2) с учетом (4) по формуле

$$N_i = 2 \log_2 k + 1. \quad (5)$$

### Алгоритм цепных дробей для нахождения двойного Диофантова приближения в классе дробей Фарея

Для каждой дроби на  $(n - 1)$ -м уровне в дереве Фарея можно непосредственно вычислить две соседние дроби, или, иными словами, «прямых потомков» на  $n$ -м уровне. Непосредственного (прямого) предшественника любой дроби (предыдущего уровня) можно найти, вычитая единицу из последнего члена ее разложения в непрерывную дробь. Другой (отдаленный) предшественник данной рациональной дроби может быть найден простым *выбрасыванием* последнего члена [10].

Согласно [8]

$$P_n \cdot Q_{n-1} - P_{n-1} \cdot Q_n = (-1)^{n-1}. \quad (6)$$

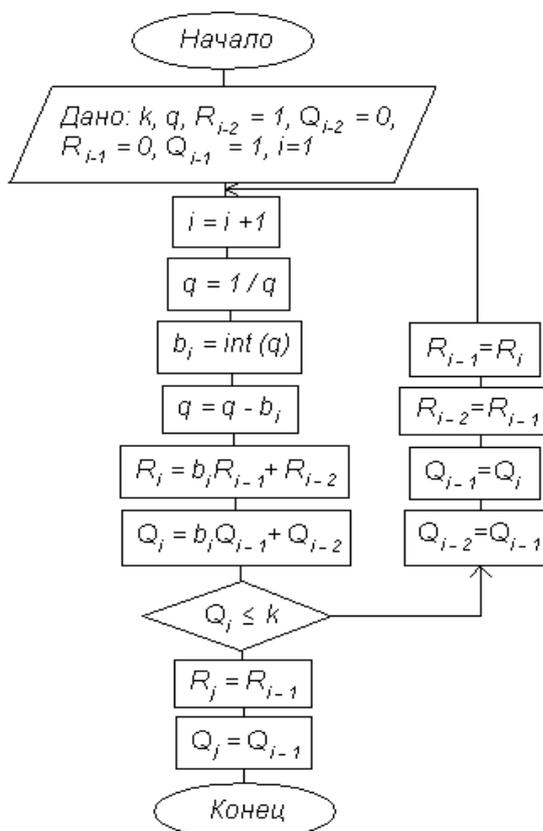


Рис. 1. Алгоритм приближения действительного числа дробью Фарея

Если количество членов в последовательности  $[b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n]$  для прямого предшественника нечетно, то потомок расположится между отдалённым и прямым предшественником, а если чётно – между прямым и отдалённым предшественником.

У любой дроби из ряда Фарея всегда есть два потомка. Назовем потомок, образованный прибавлением единицы к короткой записи исходной дроби, *коротким* потомком, а потомок, образованный прибавлением единицы к длинной записи исходной дроби, *длинным* потомком, и обозначим их соответственно как

$$\frac{P_s}{Q_s} = [b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n + 1];$$

$$\frac{P_l}{Q_l} = [b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n - 1, 2]. \quad (7)$$

Для обоих потомков справедливо, что один из них всегда больше, а другой всегда меньше исходной дроби. Количество членов в одном потомке всегда чётно, а в другом всегда нечетно. Согласно (6) потомок с чётным числом членов всегда больше своего прямого предшественника и наоборот для нечетного числа членов.

Согласно алгоритму, в зависимости от направления поиска - в сторону увеличения дробей ряда или в сторону их уменьшения и чётного или нечётного количества членов последовательности  $[b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n]$  для исходной дроби - мы должны находить либо короткий потомок, либо длинный.

Потомки равны :

$$\frac{P_s}{Q_s} = \frac{P_{\dot{e}\ddot{n}\ddot{o}} + P_{i\ddot{o}\ddot{a}}}{Q_{\dot{e}\ddot{n}\ddot{o}} + Q_{i\ddot{o}\ddot{a}}};$$

$$\frac{P_l}{Q_l} = \frac{2 \cdot P_{\dot{e}\ddot{n}\ddot{o}} - P_{i\ddot{o}\ddot{a}}}{2 \cdot Q_{\dot{e}\ddot{n}\ddot{o}} - Q_{i\ddot{o}\ddot{a}}}. \quad (8)$$

Согласно (8) для отыскания любого из потомков исходной дроби необходимо лишь знать её последнюю промежуточную дробь. Для этого достаточно использовать алгоритм приближения действительного числа дробью Фарея, приведенный на рис. 1.

В зависимости от направления поиска и чётности числа элементов в записи исходной

дроби необходимо находить значение длинного или короткого потомка. Рассмотрим случаи, когда знаменатель полученного потомка больше порядка ряда Фарея и когда он меньше или равен порядку ряда. В обоих случаях потомок будет являться медиантой исходной дроби и дроби, являющейся отдалённым предшественником исходной. В первом случае ( $Q_{nom} > k$ ) искомая дробь однозначно равна

$$\frac{P}{Q} = \frac{P_{\ddot{i}\ddot{o}} - P_{\dot{e}\ddot{n}\ddot{o}}}{Q_{\ddot{i}\ddot{o}} - Q_{\dot{e}\ddot{n}\ddot{o}}}. \quad (9)$$

Во втором случае ( $Q_{nom} \leq k$ ) искомая дробь однозначно выражается формулой

$$\frac{P}{Q} = \frac{n \cdot P_{ucx} + P_{nom}}{n \cdot Q_{ucx} + Q_{nom}},$$

где  $n = ent\left(\frac{k - Q_{\ddot{i}\ddot{o}}}{Q_{\dot{e}\ddot{n}\ddot{o}}}\right)$ . (10)

Алгоритм поиска следующей дроби Фарея приводится на рис. 2.

### Определение комбинационных помех, проходящих через «пораженные» точки

Нормированные уравнения прямых комбинационных частот имеют вид

$$q_{\dot{a}\ddot{i}\ddot{o}} = aq + c, \quad (11)$$

где  $q = f_1/f_2$  - соотношение смешиваемых частот на входе преобразователя частоты;  $f_1$  - меньшая из входных частот;  $f_2$  - большая из входных частот;  $a$  и  $c$  - целые числа.

При анализе на пораженность комбинационными частотами рассматриваются только такие частоты, коэффициенты которых удовлетворяют следующему ограничению:

$$|a| + |c| \leq p \quad (12)$$

согласно [1] либо условию

$$|a| \leq p, |c| \leq p \quad (13)$$

согласно [4].

Абсциссы пересечения комбинационных с прямыми основного преобразования в интервале  $0 \leq q \leq 1$  представляют собой последовательность рациональных дробей вида

$R/Q$  со знаменателем, не превышающим некоторое число  $k$ , и такая последовательность является последовательностью Фарея [8].

На рис. 3 изображена номограмма в окрестности  $i$ -ой "пораженной" точки.

В общем случае структура номограммы в окрестности  $i$ -ой "пораженной" точки (рис. 3) представляет собой узел пересечения комбинационных частот, крайними из которых будут комбинационные частоты с индексом  $j = 1$ , имеющие наименьший порядок.

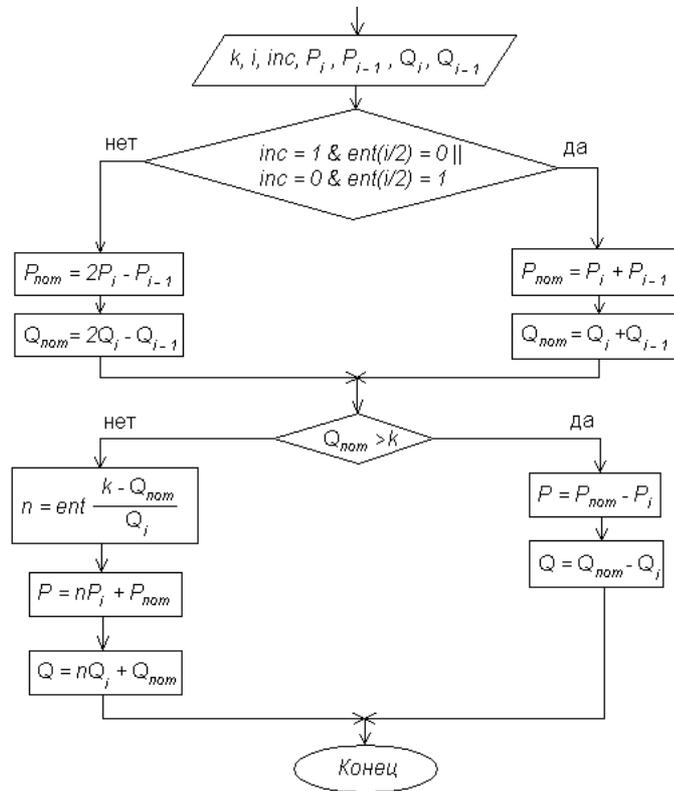


Рис. 2. Алгоритм поиска следующей дроби Фарея

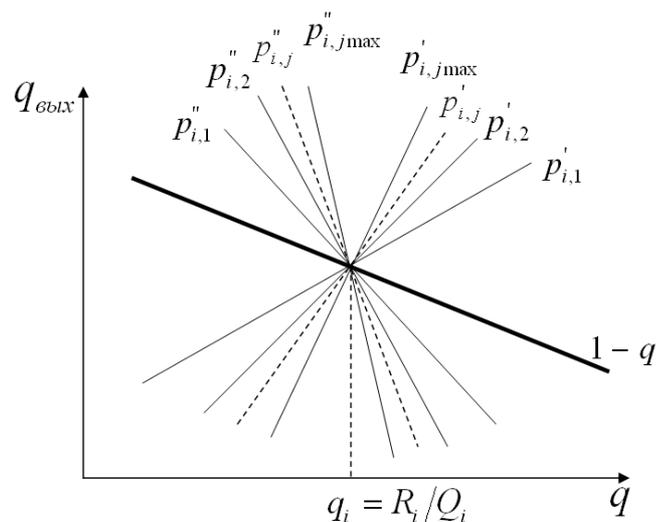


Рис. 3. Номограмма комбинационных частот в окрестности «поражённой» точки

В случае ограничения (12) максимальное число прямых комбинационных частот  $J_{max}$ , проходящих через  $i$ -ую "пораженную" точку номограммы при суммировании частот, равно

$$j_{max} = \text{ent} \left[ \frac{P}{R_i + Q_i} \right], \quad (14)$$

а при вычитании разбивается на два случая: для комбинационных частот с положительной производной

$$j_{max} = \text{ent} \left[ \frac{P + 2}{R_i + Q_i} \right] \quad (15)$$

и комбинационных частот с отрицательной производной

$$j_{max} = \text{ent} \left[ \frac{P - 2}{R_i + Q_i} \right]. \quad (16)$$

В случае ограничения (13) для суммирования частот при положительных производных комбинационных частот

$$j_{max} = \text{ent} \left[ \frac{P - 1}{Q_i} \right], \quad (17)$$

при отрицательных производных

$$j_{max} = \text{ent} \left[ \frac{P + 1}{Q_i} \right]. \quad (18)$$

Для вычитания частот при положительных производных

$$j_{max} = \text{ent} \left[ \frac{P + 1}{Q_i} \right], \quad (19)$$

при отрицательных производных

$$j_{max} = \text{ent} \left[ \frac{P - 1}{Q_i} \right]. \quad (20)$$

Для суммирования частот имеем следующие выражения для определения коэффициентов комбинационной частоты (11) с положительной производной по  $q$ :

$$a'_{i,j} = jQ_i + 1; \quad c'_{i,j} = -jR_i + 1, \quad (21a)$$

с отрицательной производной

$$a''_{i,j} = -jQ_i + 1; \quad c''_{i,j} = jR_i + 1. \quad (21б)$$

Для вычитания частот с положительной производной

$$a'_{i,j} = jQ_i - 1; \quad c'_{i,j} = -jR_i + 1, \quad (22a)$$

с отрицательной производной

$$a''_{i,j} = -jQ_i - 1; \quad c''_{i,j} = jR_i + 1. \quad (22б)$$

Подставив в (11) выражения из (21), (22), получим общее уравнение для определения комбинационных частот, проходящих через  $i$ -ую "пораженную" точку:

$$p'_{i,j} = a'_{i,j}q + c'_{i,j}. \quad (23)$$

### Геометрия областей номограммы, свободных от помех

Особый интерес составляет вопрос о форме области, ограниченной ближайшими комбинационными частотами, проходящими через соседние "пораженные" точки с номерами  $i$  и  $i + 1$ . Исходя из выводов предыдущего пункта и рис. 3, можно сделать предположение, что область, ограниченная комбинационными частотами  $p'_{i,1}$  и  $p'_{i+1,1}$ , образует четырехугольник  $ABCD$  (рис. 4).

Докажем это предположение путем следующих рассуждений: четырехугольник  $ABCD$  не пересекают комбинационные частоты  $p''_{i-1,1}$  и  $p''_{i+2,1}$ , проходящие через соседние "пораженные" точки  $q_{i-1}$  и  $q_{i+2}$ . Следовательно, для абсцисс точек пересечения комбинационных прямых  $p'_{i,1}$  и  $p'_{i+1,1}$  с прямыми  $p''_{i-1,1}$  и  $p''_{i+2,1}$  должны выполняться следующие соотношения:

$$\begin{aligned} B' < B < B''; \\ D' < D < D'', \end{aligned} \quad (24)$$

при условии, что

$$q_{i-1} < q_i < q_{i+1} < q_{i+2}. \quad (25)$$

Так как последовательность "пораженных" точек, заданных неравенством (25), можно заменить последовательностью дробей Фарея, то неравенство (25) переписывается следующим образом:

$$\frac{R_{i-1}}{Q_{i-1}} < \frac{R_i}{Q_i} < \frac{R_{i+1}}{Q_{i+1}} < \frac{R_{i+2}}{Q_{i+2}}. \quad (26) \quad B'' = D'' = \frac{R_i + R_{i+2}}{Q_i + Q_{i+2}}. \quad (29)$$

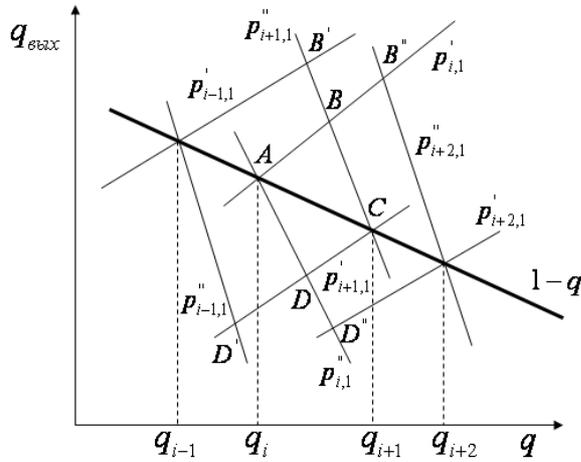


Рис. 4. Номограмма комбинационных частот

Рассмотрим значения абсцисс точек пересечения  $B$  и  $D$  комбинационных прямых  $p_{i,1}''$  и  $p_{i+1,1}'$ . Приравняв уравнения комбинационных прямых (21), (22), (23), после преобразований получим

$$B = D = \frac{R_i + R_{i+1}}{Q_i + Q_{i+1}}. \quad (27)$$

То есть абсцисса пересечения двух комбинационных прямых, проходящих через соседние "пораженные" точки, является медиантой дробей Фарея  $R_i/Q_i$  и  $R_{i+1}/Q_{i+1}$ . Следовательно, исходя из основного свойства медиант дробей Фарея [8], будет выполняться следующее неравенство:

$$\frac{R_i}{Q_i} < \frac{R_i + R_{i+1}}{Q_i + Q_{i+1}} < \frac{R_{i+1}}{Q_{i+1}}. \quad (28)$$

Теперь рассмотрим значения абсцисс точек пересечения  $B'$  и  $D'$ ,  $B''$  и  $D''$  соответственно комбинационных прямых  $p_{i-1,1}'$  и  $p_{i+1,1}''$ ,  $p_{i,1}''$  и  $p_{i+2,1}'$ . Приравняв уравнения комбинационных прямых (21), (22), (23), после преобразования получим

$$B' = D' = \frac{R_{i-1} + R_{i+1}}{Q_{i-1} + Q_{i+1}};$$

Подставив значения абсцисс точек пересечения комбинированных прямых из (27), (29) в неравенство (24), получим вместо двух неравенств (24) одно:

$$\frac{R_{i-1} + R_{i+1}}{Q_{i-1} + Q_{i+1}} < \frac{R_{i+1} + R_i}{Q_{i+1} + Q_i} < \frac{R_i + R_{i+2}}{Q_i + Q_{i+2}}. \quad (30)$$

Таким образом, доказательством того, что область, ограниченная комбинационными частотами, проходящими через соседние "пораженные" точки, суть четырехугольник, есть доказательство выполнения неравенства (30), если выполняются (25), (26).

Для этого рассмотрим попарно соседние дроби Фарея:  $R_{i-1}/Q_{i-1}$ ,  $R_i/Q_i$  и  $R_i/Q_i$ ,  $R_{i+1}/Q_{i+1}$  в одном случае и пары  $R_i/Q_i$ ,  $R_{i+1}/Q_{i+1}$  и  $R_{i+1}/Q_{i+1}$ ,  $R_{i+2}/Q_{i+2}$  в другом случае. Согласно основному свойству дробей Фарея (6) для рассматриваемых пар в первом случае имеем

$$\begin{cases} Q_i R_{i+1} - R_i Q_{i+1} = 1; \\ Q_{i-1} R_i - R_{i-1} Q_i = 1, \end{cases} \quad (31)$$

во втором случае имеем

$$\begin{cases} Q_{i+1} R_{i+2} - R_{i+1} Q_{i+2} = 1; \\ Q_i R_{i+1} - R_i Q_{i+1} = 1. \end{cases} \quad (32)$$

Разрешив системы уравнений (31), (32) относительно центральных дробей рассматриваемых пар, получим

$$\begin{aligned} \frac{R_i}{Q_i} &= \frac{R_{i+1} + R_{i-1}}{Q_{i+1} + Q_{i-1}}; \\ \frac{R_{i+1}}{Q_{i+1}} &= \frac{R_i + R_{i+2}}{Q_i + Q_{i+2}}. \end{aligned} \quad (33)$$

Подставив (33) в неравенство (28), получим неравенство

$$\frac{R_{i-1} + R_{i+1}}{Q_{i-1} + Q_{i+1}} < \frac{R_{i+1} + R_i}{Q_{i+1} + Q_i} < \frac{R_i + R_{i+2}}{Q_i + Q_{i+2}}. \quad (34)$$

Неравенство (34) всегда выполняется вследствие основного свойства медиант соседних дробей Фарея. Таким образом, утверждение, что область, ограниченная комбинационными частотами, проходящими через соседние "пораженные" точки, есть четырехугольник, есть доказательство выполнения неравенства (30), если выполняются (25), (26).

ционными частотами, проходящими через соседние "пораженные" точки, является четырехугольником, доказана.

### Реализация на ПЛИС

Одним из преимуществ программируемых логических интегральных микросхем (ПЛИС) над микропроцессорами является возможность распараллеливания выполняемых операций. При реализации алгоритма на ПЛИС уменьшается вычислительная сложность за счет того, что выполнение любой основной операции (сложение, умножение, присваивание) занимает один такт в отличие от реализации алгоритмов на микропроцессорах или микроконтроллерах. Ограничением является только частота тактирования ПЛИС (250...500 МГц). Алгоритм на основе только цепных дробей имеет максимальное количество тактов (5).

Для целого числа, меньшего  $2^{32}=4\ 294\ 967\ 296$ , количество тактов не будет превышать 65. Максимальное время выполнения алгоритма будет постоянно и для частоты 250 МГц не превысит 260 нс, для частоты 500 МГц не превысит 130 нс.

В качестве ПЛИС была выбрана Altera Cyclone II со встроенным сигнальным процессором Nios II. ПЛИС является ядром лабораторного стенда DE2-70 Terasic, обладающего большими функциональными возможностями и архитектурой для построения и отладки законченных цифровых устройств. Встроенный процессор синхронизирован со всеми компонентами ПЛИС и обеспечивает одноктактное выполнение основных операций над числами.

### Выводы

В статье предложены и реализованы методики поиска двойного диафантового приближения комбинационных составляющих в ряде Фарей произвольного порядка, приведены формулы для нахождения уравнений прямых комбинационных помех, проходящих через «поражённые» точки, и доказано, что область номограммы, свободная от комбинационных помех, является четырёхугольником. Произведена оценка использо-

вания ПЛИС для алгоритма нахождения двойного диафантового приближения на основе только цепных дробей.

### Библиографический список

1. Манасевич, В. Синтезаторы частоты (теория и проектирование): пер. с англ. [Текст] / В. Манасевич / Под ред. А. С. Галина. - М.: Связь, 1979. - 384 с.
2. Лобенштейн. Номограмма для расчёта значений комбинационных частот [Текст] / Лобенштейн // Электроника: 1973. - Т. 46. - №16.
3. Gandhi D, Lyons C. Mixer Spur Analysis with Concurrently Swept LO, RF and IF: Tools and Techniques Vol. 46, No. 5, *May 2003*, 212 p.
4. Шарапов, Ю. И. Преобразование сигнала без комбинационных частот [Текст] / Ю. И. Шарапов, Г. М. Крылов, Ю. П. Пантелеев. - М.: ИПРЖР, 2001. - 288 с.
5. Шарапов, Ю. И. Преобразование сигнала без комбинационных частот в специальных приемниках [Текст] / Ю. П. Шарапов. - М.: Издательство «САЙНС-ПРЕСС», 2009. - 256 с.
6. Логинов, В. И. Номограмма комбинационных частот - алгоритмический подход [Текст] / В. И. Логинов, С. А. Маркова // Радиотехника. - 1989. - № 1. - С. 44-46.
7. Логинов, В. И. Программа расчёта номограммы комбинационных частот // WWW.VGAVT-NN.RU: сервер волжской государственной академии водного транспорта, 2009. RL: [http://www.vgavt-nnov.ru:100/informatika/downloads.php?cat\\_id=1&download\\_id=10](http://www.vgavt-nnov.ru:100/informatika/downloads.php?cat_id=1&download_id=10) (дата обращения: 25.12.2009).
8. Бухштаб, А. А. Теория чисел [Текст] / А. А. Бухштаб. - М.: Учпедгиз, 1960.-375 с.
9. Шмидт, В. Диафантовы приближения [Текст] / В. Шмидт. - М.: Мир, 1983.-232с.
10. Хинчин, А. Я. Цепные дроби [Текст] / А. Я. Хинчин. - М.: Наука, 1978. -112с.
11. Шредер, М. Фракталы, хаос, степенные ряды. Миниатюры из бесконечного ряда. - Ижевск [Текст] / М. Шредер. - НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» 2001.- 528 с.

## FPGA USING IN SYSTEMS OF AUTOMATED FREQUENCY DISTRIBUTION

© 2011 P. I. Grushin<sup>1</sup>, V. I. Loginov<sup>2</sup>, N. P. Yampurin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Arzamas polytechnic institute (department) NSTU named after R. Y. Alekseev

<sup>2</sup>Volga state academy of water transportation

Algorithms for calculating the combination components in nonlinear frequency conversion based on Farey series. The approaches that do not use the synthesis of the entire series Farey, allowing to solve the problem of "failure" combination frequencies frequency converter only on the basis of the synthesis of the next component of the nonlinear frequency operating frequencies conversion systems. Methods for finding the parameters of Raman noise, straight pass through the "failure" point are proposed. We prove that the area of the nomogram, free from interference of combination, is a quadrangle.

*Frequency conversion, combinational components, infinite fractions, Farey series.*

### Информация об авторах

**Грушин Павел Игоревич**, аспирант Арзамасского политехнического института НГТУ им. Р. Е. Алексеева. E-mail: [grushin@tecomgroup.ru](mailto:grushin@tecomgroup.ru). Область научных интересов: преобразование частоты.

**Логинов Вячеслав Иванович**, к.т.н., доцент кафедры ИАПП, Волжская государственная академия водного транспорта. E-mail: [loginov@aquasci-nnov.ru](mailto:loginov@aquasci-nnov.ru). Область научных интересов: проектирование систем нелинейного преобразования частоты.

**Ямпурин Николай Петрович**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой КиТРЭС Арзамасского политехнического института НГТУ им. Р. Е. Алексеев. E-mail: [yampurin@arzamas.nnov.ru](mailto:yampurin@arzamas.nnov.ru). Область научных интересов: синтезаторы частоты радиоэлектронных систем.

**Grushin Pavel Igorevich**, post-graduate student of Arzamas polytechnic institute NSTU named after R. Y. Alekseev. E-mail: [grushin@tecomgroup.ru](mailto:grushin@tecomgroup.ru). Research interests: frequency converters.

**Loginov Vyacheslav Ivanovich**, Ph. D, docent of Volga state academy of water transportation. E-mail: [loginov@aquasci-nnov.ru](mailto:loginov@aquasci-nnov.ru). Research interests: design of nonlinear frequency conversion.

**Yampurin Nicolay Petrovich**, doctor of technical sciences, professor of Arzamas polytechnic institute (department) NSTU named after R. Y. Alekseev. E-mail: [yampurin@arzamas.nnov.ru](mailto:yampurin@arzamas.nnov.ru). Research interests: synthesis frequency electronic systems.

УДК 621.384.62

## ЦИКЛИЧЕСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

© 2011 А. В. Пияков

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Представлены теория, расчётные параметры и детали конструкции циклического ускорителя, позволившего разгонять заряженные микрочастицы диаметром 0,1...10 мкм до скоростей 25 км/с. Общее эффективное ускоряющее напряжение составляет 5 МВ. Отличие этого ускорителя от существующих состоит в том, что все трубки дрейфа динамического контура выполнены одинаковыми, а синфазность движения частицы с напряжением на трубках дрейфа осуществляется путем формирования ускоряющего напряжения как функции скорости частицы и ее удельного заряда, а также в циклическом контуре ускорителя.

*Ускоритель, микрометеорит, пылевая частица, дефлектор, трубка дрейфа.*

### Введение

В последние годы сохраняется тенденция увеличения концентрации высокоскоростных техногенных пылевых частиц на околоземных орбитах. По некоторым данным, уже сейчас концентрация техногенных пылевых частиц в три раза превышает концентрацию микрометеоритов естественного происхождения. Учитывая всё повышающиеся требования к надёжности и долговечности космических аппаратов, а также появление множества новых материалов, необходимо дальнейшее развитие исследований процессов взаимодействия высокоскоростных пылевых частиц с материалами элементов конструкций космических аппаратов.

Для проведения ударных экспериментов используются различные типы ускорителей, однако наиболее “чистыми” являются электростатические и линейные ускорители, в которых ускорение частиц осуществляется энергией электрического поля. Такие ускорители высокоскоростных твёрдых частиц основаны на ускоряющей системе Слоуна – Лоуренса, где синфазность движения частиц с изменением напряжения на трубках дрейфа достигается путем выполнения дрейфовых трубок разной длины. Они имеют узкий диапазон ускоряемых частиц и небольшое число ускоряющих секций, что обусловлено тем, что данная система не позволяет ускорять частицы в широком диапазоне масс

без предварительной перенастройки геометрии ускоряющего тракта. Кроме того, данному классу ускорителей характерны относительно большие габариты и масса.

### Конструкция ускорителя

Для дальнейшего повышения эффективного ускоряющего напряжения предложена конструкция циклического ускорителя твёрдых частиц. В основе этого ускорителя лежит принцип электродинамического ускорения частиц. Удержание частиц в замкнутом ускоряющем тракте осуществляется посредством тороидальных дефлекторов. Структурная схема циклического ускорителя пылевых частиц приведена на рис. 1.

Ускоритель работает следующим образом. Инжектор частиц выпускает в тракт заряженные частицы с требуемым интервалом следования (примерно 1 частица в секунду). Частица последовательно проходит первую измерительную линейку, ЛЭСУ, вторую измерительную линейку и попадает в тракт циклического ускорителя. По измеренным временам пролёта первой и второй измерительных линеек, а также заданному напряжению ЛЭСУ система управления ускорителем вычисляет удельный заряд частицы. Затем частица пролетает несколько кругов по тракту циклического ускорителя, каждый раз ускоряясь в четырех ЛЭДУ. Управляемые тороидальные дефлекторы предназначены для

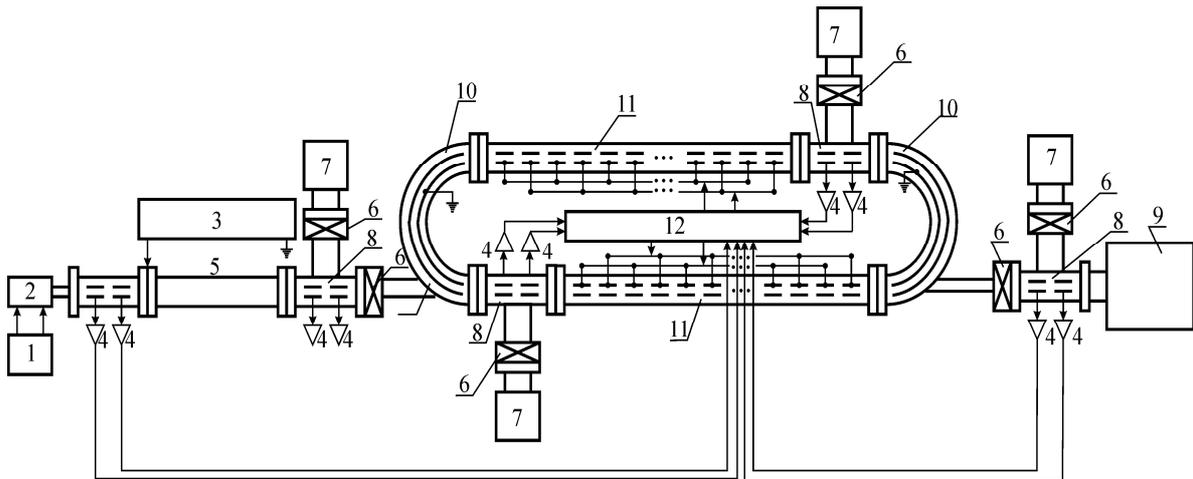


Рис. 1. Структурная схема циклического ускорителя пылевых частиц: 1- источник питания инжектора; 2 – инжектор заряженных частиц; 3 – источник высокого напряжения (~100кВ); 4 – зарядочувствительный усилитель; 5 – линейный электростатический ускоритель (ЛЭСУ); 6 – вакуумный отсекаель; 7 – система вакуумной откачки и контроля вакуума (СВОКВ); 8 – измерительная линейка; 9 – вакуумная камера для экспериментов; 10 – управляемый тороидальный дефлектор; 11 – линейный электродинамический ускоритель (ЛЭДУ); 12 – система управления ускорителем

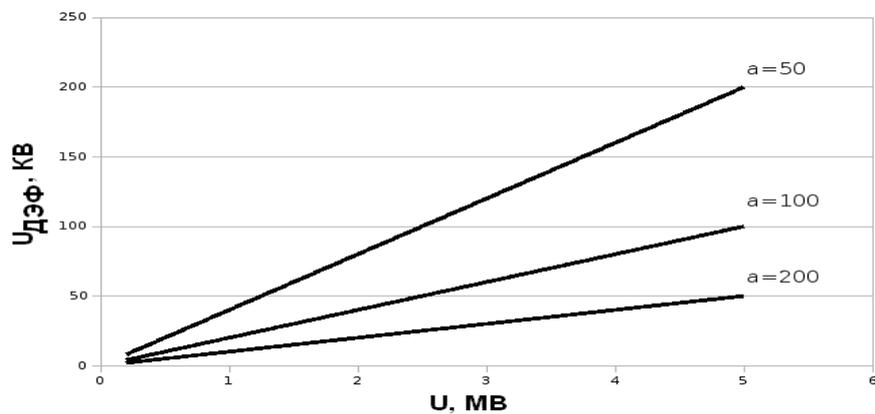


Рис. 2. Зависимость отклоняющего напряжения от эквивалентного ускоряющего напряжения для различных значений коэффициента геометрии поля. Зазор между пластинами  $d = 10$  мм

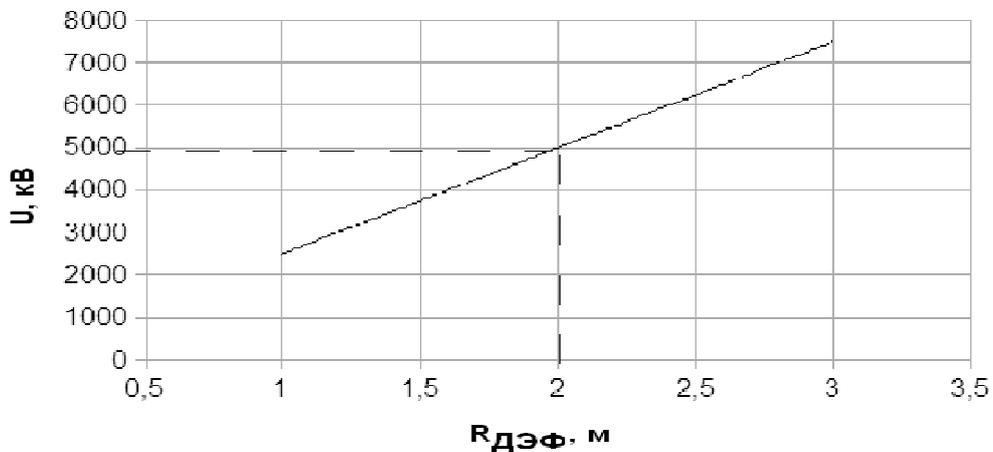


Рис. 3. График зависимости максимального ускоряющего напряжения от радиуса дефлектора для зазора между пластинами  $d=10$  мм

искривления траектории частицы. В зависимости от скорости частицы (которая постоянно измеряется измерительными линейками, установленными в контуре циклического ускорителя) и её удельного заряда система управления ускорителем управляет высоковольтными усилителями импульсов и высоковольтным усилителем напряжения, которые в свою очередь формируют необходимые напряжения на дрейфовых трубках ЛЭДУ и на обкладках тороидальных дефлекторов. В момент достижения частицей критической скорости (той скорости, при которой максимального выходного напряжения высоковольтного усилителя напряжения становится недостаточно, чтобы удержать частицу в тракте за счет тороидальных дефлекторов) процесс ускорения прекращается и частица выводится в вакуумную камеру для экспериментов. ЭВМ предназначена для ведения статистики об ускоряемых частицах с помощью специально разработанного программного обеспечения.

Технико-экономическая эффективность использования разработки выражается прежде всего в существенной дешевизне лабораторного моделирования по сравнению с постановкой натуральных экспериментов на космических аппаратах. Оптимальное применение материалов и рациональное конструирование, основанное на результатах лабораторных экспериментов, позволят увеличить срок службы космических аппаратов, более точно прогнозировать срок их службы и надежность. Особенно актуальны такие исследования при проектировании аппаратов, предназначенных для научных экспериментов в дальнем космосе при изучении комет, где плотность потока пылевых частиц высока.

### Расчёт скорости и энергии частицы

Эквивалентное ускоряющее напряжение линейного электродинамического ускорителя определяется выражением

$$U = U_{\text{эф}} \cdot T_0,$$

где  $T_0$  – времяпролетный коэффициент электродинамического ускорителя;  $U_{\text{эф}}$  – эффективное ускоряющее напряжение ускорителя.

Эквивалентное ускоряющее напряжение всего ускорителя определяется выражением

$$U_{\Sigma} = U \cdot N,$$

где  $N$  — количество пройденных электродинамических ускорителей.

Максимально возможная скорость частицы при этом будет определяться выражением

$$V_{\text{MAX}} = \sqrt{2 \frac{q}{m} U T_0 + V_0^2},$$

где  $q/m$  – удельный заряд;  $V_0$  – скорость частицы на входе.

Максимальное число кругов, которые частица пройдет в ускорителе, будет определяться из условия равнодействия центробежной силы движения частицы в дефлекторе и электростатической силы электрического поля дефлектора. Отклоняющее напряжение можно оценить по формуле

$$U_{\text{дэф}} = \frac{m \cdot V^2}{q \cdot a} = \frac{2U}{a},$$

где  $a = \frac{1}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$  – коэффициент геометрии

поля;  $R_1, R_2$  – внутренний и внешний радиусы пластин дефлектора.

### Оценка максимально достижимых скоростей

Максимальная скорость на выходе и максимальное отклоняющее напряжение связаны соотношениями:

$$\begin{cases} V_{\text{MAX}} = \sqrt{2 \frac{q}{m} U T_0 + V_0^2} \\ U_{\text{дэф}} = \frac{m \cdot V^2}{q \cdot a} \end{cases},$$

Максимальная напряжённость электрического поля для различных методов обработки поверхности соответственно будет равна: 50 кВ/см — для механической, 70 кВ/см — для гальванической, 100 кВ/см — для ионной обработки.

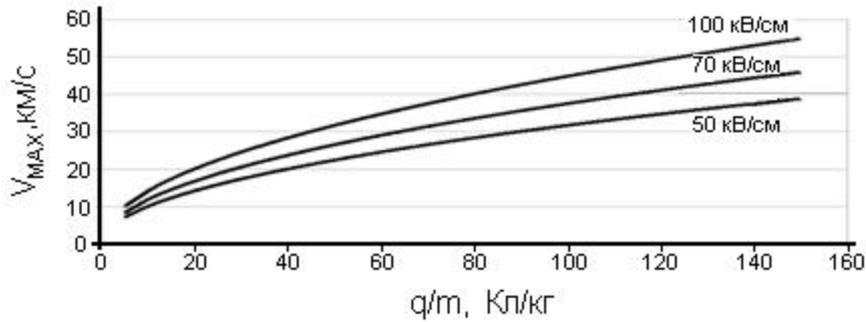


Рис. 4. Зависимость максимально достижимой скорости от удельного заряда  $q/m$  для различных максимально допустимых отклоняющих напряжений. Радиус основной траектории дефлектора  $R=2\text{м}$ , ширина зазора между пластинами  $d = 10\text{ мм}$

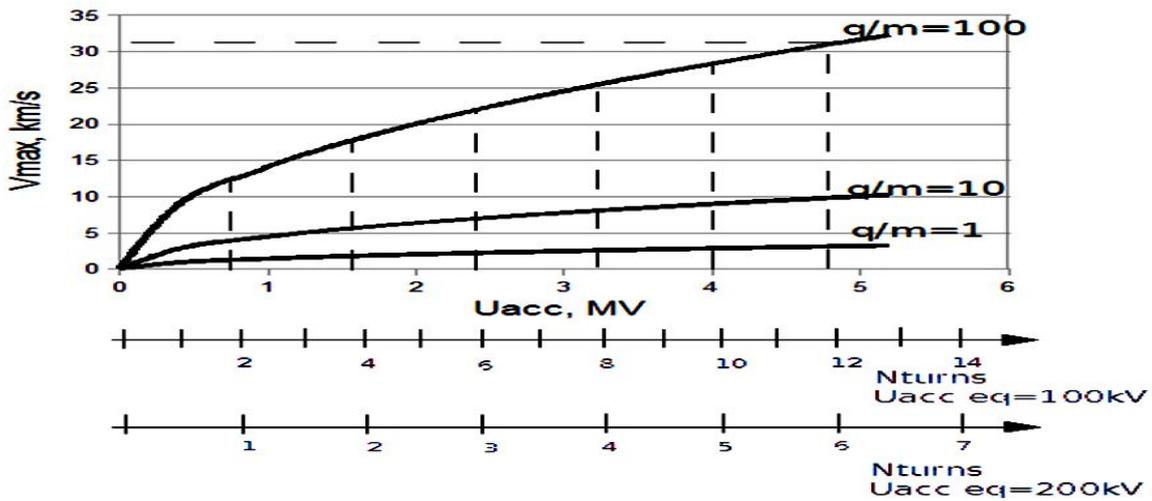


Рис. 5. График зависимости максимально достижимой скорости от ускоряющего напряжения для различных удельных зарядов  $q/m$ :  $N_{turns}$  – число витков, необходимое для достижения данной скорости;  $U_{acc\ eq}$  – эквивалентное ускоряющее напряжение линейного электродинамического ускорителя

Таблица 1. Расчёт конструкции ускорителя

$U_{acc\ pre}$ [кВ], напряжение предускорителя	100
$N_{gaps}$ , количество промежутков электродинамического ускорителя	10...20
$U_{gap}$ [кВ], ускоряющее напряжение промежутка	10
$U_{acc\ eq}$ [кВ], эквивалентное ускоряющее напряжение электродинамического ускорителя	100...200
$R_1$ [м], радиус внутренней пластины дефлектора	1,995
$R_2$ [м], радиус внешней пластины дефлектора	2,005
$d$ [м], ширина зазора между пластинами	0,01
$a$ , коэффициент геометрии поля	200
$U_{def}$ [кВ], максимально допустимое отклоняющее напряжение	50
$n$ , требуемое число ускорений	24...12
$N$ , требуемое число витков	6...3
$U_{acc}$ [МВ], суммарное ускоряющее напряжение	4,9

**Оценка необходимого числа оборотов**

Максимальная скорость частицы достигается после некоторого числа ускорений. Зависимость требуемого числа ускорений от параметров ускорителя определяется выражениями

$$n_{req} = \frac{U_{ДФМАХ} \cdot \frac{a}{2}}{U}, N_{req} = \frac{n_{req}}{2},$$

где  $U_{ДФ МАХ}$  - максимально допустимое отклоняющее напряжение;  $U$  - эквивалентное ускоряющее напряжение линейного электро-

динамического ускорителя;  $N_{req}$  - требуемое число витков.

**Расчет конструкций ускорителя**

Расчет характеристик ускорителя двух разных конструкций приведен в табл. 1

**Библиографический список**

1. Alexandre Pozwolski, Compact laser-driven accelerator of macroparticles. Laser and Particle Beams 2001, 19.

**CYCLIC ACCELERATOR OF CHARGED PARTICLES**

© 2011 A.V. Piyakov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The theory, design parameters and construction details of a cyclic accelerator in Zvolen accelerate charged microparticle diameter 0.1 ... 10 mm up to velocities of 25 km / s are presented. The total effective accelerating voltage of 5 MV. The essential difference from the accelerator of the existing is that all of the drift tube of the dynamic circuit made the same, and in-phase motion of the particle to the voltage across the drift tubes is accomplished by forming the accelerating voltage as a function of particle velocity and its specific charge, as well as in cyclic accelerator circuit .

*Accelerator, micrometeors, dust particles, the deflector, drift tube.*

**Информация об авторе**

**Пияков Алексей Владимирович**, докторант, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, к.т.н., доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва. E-mail: [piyakov@ssau.ru](mailto:piyakov@ssau.ru). Область научных интересов: физика ускорителей частиц, космические эксперименты.

**Piyakov Aleksey Vladimirovich**, assistant professor of design and production of radio-electronic means, Ph.D., associate professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [piyakov@ssau.ru](mailto:piyakov@ssau.ru). Sphere of scientific interests: accelerators physics, space devices development.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЛЕНТЫ В СТРИМЕРАХ ПРИ НАЛИЧИИ ПЕРЕКОСА И НЕРАВНОМЕРНОСТИ СКОРОСТИ ЕЁ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ

© 2011 В. Е. Лялин, В. П. Тарануха

Ижевский государственный технический университет

Получено решение двумерной граничной задачи колебания магнитной ленты без учёта ее массы. В отличие от ранее используемых управлений учтены скорость протягивания магнитной ленты и ее проскальзывание при входе на свободный участок.

*Перекося ленты, стримеры, механизм транспортирования ленты.*

Увеличение продольной и поперечной плотности записи информации на магнитной ленте (МЛ) требует существенного улучшения динамических характеристик механизмов транспортирования ленты (МТЛ), применяемых в ленточных накопителях информации (стримерах). Многочисленными исследованиями установлены закономерности образования временных искажений информации по одной дорожке, когда МЛ рассматривается как упругая нить. Модель МЛ в виде двумерной среды позволяет описать другой вид искажений – динамические перекося, т.е. временные рассогласования между различными дорожками, что особенно важно для стримеров с широкими МЛ (8 мм и более). Теоретическое исследование упругих деформаций, приводящих к перекосям, приведено в работах [1, 2], ряд работ посвящён экспериментальным исследованиям. Однако применение полученных в [1, 2] результатов на практике затруднено неадекватностью граничных условий, т.к. реально в точках контакта МЛ с ведущими валами задаются линейные скорости, а не напряжения, как указано в работах [1, 2]. В работе [3] представлено уточнение волновых свойств МЛ с учётом ее ширины, хотя поправки, получаемые с учётом инерциальных свойств МЛ, в целом незначительны и ими на практике пренебрегают. Поэтому в настоящей работе приводится решение задачи о плоском напряжённом состоянии МЛ, на двух краях которой заданы скорости перемещения, а два других свободны.

Как показано в работе [4], плоская задача движения МЛ между двумя вращающимися с заданной скоростью валами имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 U_x}{\partial x \partial y} + b \frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + a \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} &= 0, \\ \frac{\partial^2 U_y}{\partial x \partial y} + a \frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} V_x(-l, y, t) - V_0 \Theta(-l, y, t) &= \bar{V}_x(y, t) - V_0 \bar{\Theta}(y, t), \\ V_y(-l, y, t) &= \bar{V}_y(y, t), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} V_x(l, y, t) &= \bar{\bar{V}}_x(y, t), \\ V_y(l, y, t) &= \bar{\bar{V}}_y(y, t), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{yy}(x, y, t) &= 0 \\ \sigma_{xy}(x, y, t) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ при } \begin{cases} y = 0, \\ y = H, \end{cases}$$

где  $U_x = U_x(x, y, t)$ ,  $U_y = U_y(x, y, t)$  – перемещения,  $V_x$ ,  $V_y$  – абсолютные скорости,  $\Theta$  – относительная объёмная деформация МЛ в неподвижной системе координат,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{xy}$  – напряжения,  $\lambda$ ,  $\mu$  – коэффициенты Ляме,  $V_0$  – скорость перемещения МЛ (номинальная),  $2l$ ,  $H$  – геометрические размеры отрезка МЛ,  $\bar{V}_x$ ,  $\bar{\bar{V}}_x$ ,  $\bar{V}_y$ ,  $\bar{\bar{V}}_y$ ,  $\bar{\Theta}$  – заданные на границах абсолютные скорости и относительная объёмная деформация,

$$a = 4(\lambda + \mu)(3\lambda + 2\mu)^{-1},$$

$$b = (\lambda + 2\mu)(3\lambda + 2\mu)^{-1} \text{ (рис. 1).}$$

Выражая напряжения, абсолютные скорости, относительную объёмную деформацию через перемещения

$$\left. \begin{aligned} V_x &= \frac{\partial U_x}{\partial t} + V_0 \frac{\partial U_x}{\partial x}, & V_y &= \frac{\partial U_y}{\partial t} + V_0 \frac{\partial U_y}{\partial x}, \\ \Theta &= 2\mu(\lambda + 2\mu)^{-1} \left( \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} \right), \\ \sigma_{yy} &= 2(\lambda + \mu) \frac{\partial U_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial U_x}{\partial x}, & \sigma_{xy} &= \mu \left( \frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

и исключив из (1) одну из неизвестных функций, например  $U_x$ , получим

$$U_x(x, y, t) = -a \int \frac{\partial U_y}{\partial y} dx - b \int \frac{\partial U_y}{\partial x} dy - f_x(x, t) - f_y(y, t) - f_t(t), \quad (6)$$

где  $f_x, f_y, f_t$  – неизвестные функции – постоянные интегрирования.

Таким образом, краевая смешанная задача (1)...(4) принимает вид

$$\frac{\partial^4 U_y}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 U_y}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 U_y}{\partial y^4} = 0. \quad (7)$$

При  $x = -l$ :

$$\left. \begin{aligned} b \int \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial U_y}{\partial t} + \alpha_1 \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) \right] dy + a \int \left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial U_y}{\partial t} + \alpha_1 \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) \right] dx + \\ + \frac{\partial f_x}{\partial t} + \alpha_1 \frac{\partial f_x}{\partial x} + \alpha_2 \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial f_y}{\partial t} + \frac{\partial f_t}{\partial t} = -(\bar{V}_x - V_0 \bar{\Theta}), \\ \frac{\partial U_y}{\partial t} + V_0 \frac{\partial U_y}{\partial x} = \bar{V}_y, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

при  $x = l$ :

$$\left. \begin{aligned} b \int \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial U_y}{\partial t} + V_0 \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) \right] dy + a \int \left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial U_y}{\partial t} + V_0 \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) \right] dx + \\ + \frac{\partial f_x}{\partial t} + V_0 \frac{\partial f_x}{\partial x} + \frac{\partial f_y}{\partial t} + \frac{\partial f_t}{\partial t} = -\bar{V}_x, \\ \frac{\partial U_y}{\partial t} + V_0 \frac{\partial U_y}{\partial x} = \bar{V}_y, \end{aligned} \right\}$$

при  $y = 0,$   
 $y = H$ :

$$\left. \begin{aligned} (a - \gamma) \frac{\partial U_y}{\partial y} + b \int \frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} dy + \frac{\partial f_x}{\partial x} = 0, \\ (b - 1) \frac{\partial U_y}{\partial x} + a \int \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} dx + \frac{\partial f_y}{\partial y} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $\alpha_1 = V_0 \lambda (\lambda + 2\mu)^{-1}$ ,  $\alpha_2 = 2V_0 \mu (\lambda + 2\mu)^{-1}$ ,  $\gamma = (\lambda + 2\mu) \lambda^{-1}$ .

Используя методы разложения неизвестных и заданных функций в ряды Фурье на отрезке  $y \in [0, H]$  и удовлетворяя условиям (8), (9), ищем решение задачи в виде монохроматических колебаний с произвольной частотой  $\omega_0$ :

$$\left. \begin{aligned} U_y(x, y, t) &= e^{i\omega_0 t} \left[ \sum_{k=1}^{\infty} U_{jk}(x) \sin \lambda_k y + \bar{U}_y(x, y) \delta(y) + \bar{U}_y(x, y) \delta(y - H) \right], \\ f_x(x, t) &= e^{i\omega_0 t} \bar{f}_x(x), \\ f_y(y, t) &= e^{i\omega_0 t} \left( f_{y0} + \sum_{k=1}^{\infty} f_{yk} \cos \lambda_k y \right), \\ f_t(t) &= A e^{i\omega_0 t}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

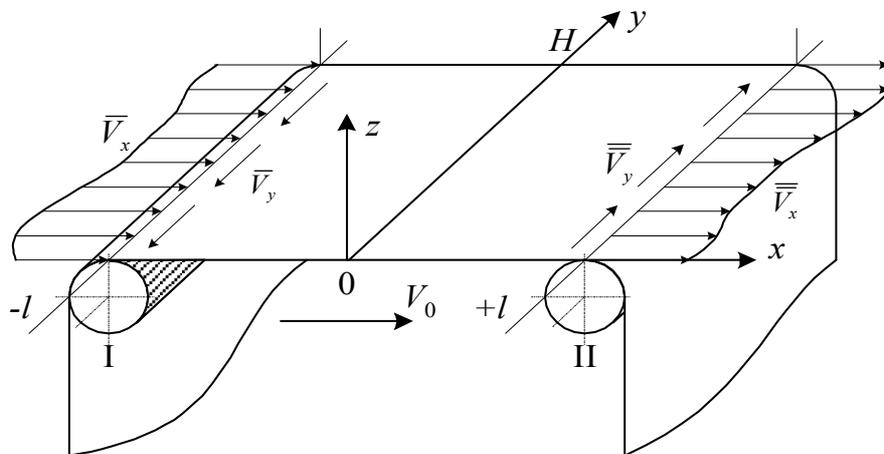


Рис. 1. Система координат и граничные условия

где  $\lambda_k = k\pi H^{-1}$ ,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $f_{y0}$ ,  $f_{yk}$ ,  $U_{yk}$ ,  $\bar{U}_y$ ,  $\bar{f}_x$ ,  $A_i$  – комплексные величины и функции, подлежащие определению. Введение  $\delta$ -функций Дирака в выражения (10) связано с устранением разрывов функций  $\bar{V}_y$ ,  $\bar{V}_y$  в угловых точках при разложении их в ряды Фурье по нечётным функциям. Уравнение (7) будет удовлетворено, если

$$U_{yk}(x) = c_{1k} \operatorname{sh} \lambda_k x + c_{2k} \operatorname{ch} \lambda_k x + c_{3k} x \operatorname{sh} \lambda_k x + c_{4k} x \operatorname{ch} \lambda_k x, \quad (11)$$

где  $c_{jk}$  ( $j=1, \dots, 4$ ) – неизвестные постоянные. Подставляя выражения (10), (11) в (7)...(9) и решая уравнения без учета слагаемых, содержащих  $\delta$ -функции, получим

$$\left. \begin{aligned} \bar{f}_x(x) &= \sum_{k=\text{нечетн}}^{\infty} b\lambda_k^{-1} \frac{\partial U_{yk}}{\partial x} + (y-a)\lambda_k \int U_{yk} dx, \\ f_{y0} &= \bar{V}_x \omega_0^{-1} i - \bar{f}_x(l) + Ri \frac{\partial \bar{f}_x(x)}{\partial x} \Big|_{x=l}, \quad f_{yk} = \bar{V}_{xk} \omega_0^{-1} i, \quad A_i = 0. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Неизвестные постоянные  $c_{jk}$ , входящие в выражение (11), определяем из системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} (-h_1 th \lambda_k l + h_2) & (h_1 - h_2 th \lambda_k l) & (h_3 th \lambda_k l - h_4) & (-h_3 + h_4 th \lambda_k l) \\ (h_1 - h_2 th \lambda_k l) & (-h_1 th \lambda_k l + h_2) & (h_5 th \lambda_k l - h_1 l) & (-h_5 + h_1 l th \lambda_k l) \\ (h_1 + h_2 th \lambda_k l) & (h_1 th \lambda_k l + h_2) & (h_6 th \lambda_k l + h_1 l) & (h_6 + h_1 l th \lambda_k l) \\ (h_7 th \lambda_k l) & (h_8 th \lambda_k l + h_9) & (h_{10} th \lambda_k l + h_{11}) & (h_{12} th \lambda_k l + h_7 l) \end{vmatrix} \times \\ & \times \begin{vmatrix} \bar{V}_x - \bar{V}_x + V_0 \bar{\Theta} \\ \operatorname{ch} \lambda_k e \\ \bar{V}_{yk} \operatorname{ch}^{-1} \lambda_k e \\ \bar{V}_{yk} \operatorname{ch}^{-1} \lambda_k e \\ \bar{V}_x - \bar{V}_x - V_1 \bar{\Theta} \\ \operatorname{ch} \lambda_n e \end{vmatrix}, \quad (13) \end{aligned}$$

где  $R$  – радиус вала,

$$\begin{aligned} h_1 &= V_0 \lambda_k; h_2 = \omega_0 i; h_3 = \omega_0 \lambda_k^{-1} (a+b)i + V_0 l \lambda_k; \\ h_4 &= 2b\alpha_1 + \omega_0 li; h_5 = \omega_0 li - V_0; h_6 = V_0 + h_2 l; \\ h_7 &= (\gamma-1)(V_0 + \alpha_1) \lambda_k; h_8 = 2(\gamma-1)h_2; \\ h_9 &= \lambda_k (\gamma-1)(V_0 - \alpha_1); \\ h_{10} &= 2h_2(a+b-\gamma) \lambda_k^{-1} + h_9 l; \\ h_{11} &= 2b(V_0 - \alpha_1) + h_8 l, h_{12} = 2b(V_0 + \alpha_1). \end{aligned}$$

Откуда находим

$$\begin{aligned} c_{jk} &= (L_{jk}^D \operatorname{ch}^{-1} \lambda_k l) + (L_{jk}^M \operatorname{ch}^{-1} \lambda_k l) i, \\ \text{где } L_{jk}^D &= L_{jk}^D (\bar{V}_{xk}, \bar{V}_{xk}, \bar{V}_{yk}, \bar{V}_{yk}, \bar{V}_{x0}, \bar{V}_{x0}); \\ L_{jk}^M &= L_{jk}^M (\bar{V}_{xk}, \bar{V}_{xk}, \bar{V}_{yk}, \bar{V}_{yk}, \bar{V}_{x0}, \bar{V}_{x0}). \end{aligned}$$

Аналитические выражения коэффици-

ентов  $L_{jk}^D$ ,  $L_{jk}^M$  не приводятся ввиду их громоздкости.

Функции

$$\bar{U}_y(x, y) \delta(y), \quad \bar{U}_y(x, y) \delta(y-H)$$

для упрощения решения задачи определяются приближённо. Введем функцию

$$\tilde{U}_y(x, y) = \sum_k U_{yk}(x) \sin \lambda_k y$$

и, выбирая малое значение  $\varepsilon > 0$ , определим касательные к  $\tilde{U}_y$  в точках  $y = 0 + \varepsilon$ ,  $y = H - \varepsilon$  (рис. 2).

Значения касательных в точках  $y = 0$ ,  $y = H$  примем за приближённые значения функций  $\bar{U}_y(x, y) \delta(y)$  и  $\bar{U}_y(x, y) \delta(y-H)$  соответственно. Тогда

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_y(x, y) \delta(y) &\approx \\ &\approx \sum_k U_{yk}(x) \sqrt{1 + \lambda_k^2 \varepsilon^2} \sin(\lambda_k \varepsilon - \arctg \lambda_k \varepsilon) \delta(y), \\ \bar{U}_y(x, y) \delta(y-H) &\approx \\ &\approx \sum_k U_{yk}(x) \sqrt{1 + \lambda_k^2 \varepsilon^2} \sin(\lambda_k (H - \varepsilon) + \arctg \lambda_k \varepsilon) \delta(y-H), \\ U_x(x, y, t) &= \sum_k \left\{ \left[ B_{1k} \sin(\omega_0 t + \varphi_{1k}) + \right. \right. \\ &+ F_{2k}(x) \sin(\omega_0 t + \varphi_{2k}(x)) \left. \right] \cos \lambda_k y + \\ &+ F_{3k}(x) \sin(\omega_0 t + \varphi_{3k}(x)) \left. \right] + F_{5k}(x) \sin(\omega_0 t - \varphi_{5k}) \left. \right\}, \\ U_y(x, y, t) &= \sum_k \left\{ \left[ \sin \lambda_k y + \sqrt{1 + \lambda_k^2 \varepsilon^2} \left[ \sin(\lambda_k \varepsilon - \arctg \lambda_k \varepsilon) \delta(y) + \right. \right. \right. \\ &+ \sin(\lambda_k (H - \varepsilon) + \arctg \lambda_k \varepsilon) \delta(y-H) \left. \right] + \\ &+ F_{4k}(x) \sin(\omega_0 t + \varphi_{4k}(x)) \left. \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Входящие в (14) величины  $B_{1k}$ ,  $\varphi_{1k}$ ,  $F_{5k}$ ,  $\varphi_{5k}$  и функции переменной величины  $x$   $F_{2k}$ ,  $\varphi_{2k}$ ,  $F_{3k}$ ,  $\varphi_{3k}$ ,  $F_{4k}$ ,  $\varphi_{4k}$ , выраженные через известные параметры задачи и постоянные  $c_{jk}$ , не приводятся ввиду громоздкости выражений.

Так как оси вращения валов не совпадают с их геометрическими осями центров, законы изменения линейных скоростей на границах МЛ имеют вид:

$$\begin{aligned} V_x(y, t) &= V_0 [1 + \varepsilon_j(y) R^{-1} \cos(\omega_0 t + \varphi_j(y))], \\ V_y(y, t) &= R \omega_0 \sqrt{a_j(a_j + H^2)^{-1}} \cos(\omega_0 t), \quad (15) \end{aligned}$$

где  $j = 1, 2$  – номер вала;

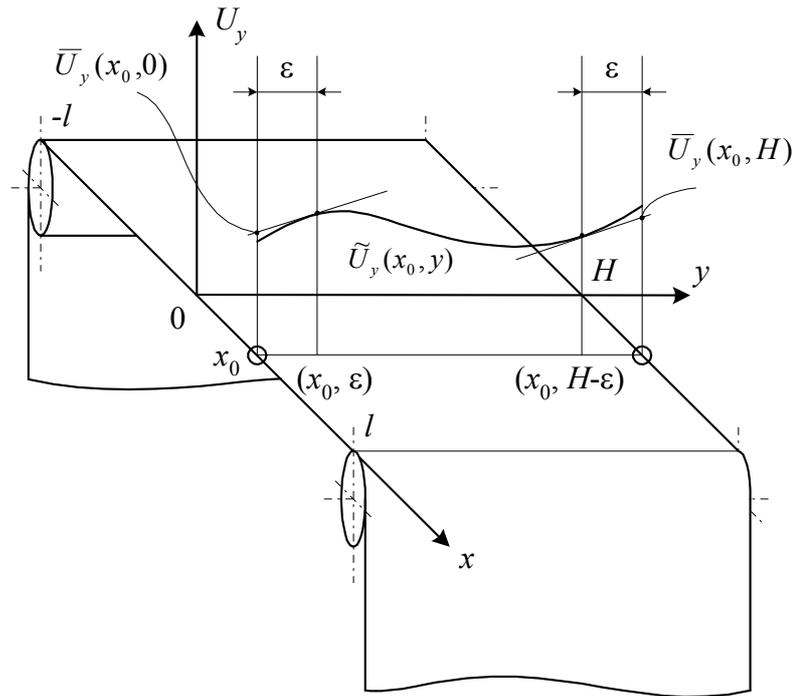


Рис. 2. Приближённое определение функций  $\bar{U}_y$  на границах  $y=0, y=H$

$a_j = \varepsilon_{jH}^2 + \varepsilon_{jk}^2 - 2\varepsilon_{jH}\varepsilon_{jk} \cos \varphi_{jk}$ ,  $\varepsilon_j(y)$ ,  
 $\varphi_j(y)$  – изменение эксцентриситета и угла его поворота вдоль оси  $y$ ;  $\varepsilon_{jH}$ ,  $\varepsilon_{jk}$ ,  $\varphi_{jk}$  – начальное и конечное значения эксцентриситета и угла поворота. Считая, что изменение относительной деформации в зоне проскальзывания первого вала целиком зависит от относительного удлинения МЛ в направлении оси  $y$ , прием

$$\Theta(y, t) = 2\mu(\lambda + 2\mu)^{-1} \varepsilon_1(y)(2l)^{-1} \sin(\omega_0 t + \varphi_1(y)). \quad (16)$$

В дальнейшем, для примера, не учитывая движения МЛ вдоль оси и принимая  $\varepsilon_2(y) = \varepsilon_{2H} - (\varepsilon_{2H} - \varepsilon_{2k})H^{-1}y$ ,  $\varepsilon_1(y) = \varepsilon_0$ , получим граничные условия (2)–(3) в виде

$$\left. \begin{aligned} &V_x(-l, y, t) - V_0 \Theta(-l, y, t) = \\ &= V_0 [1 + \varepsilon_0 R^{-1} \cos(\omega_0 t + \varphi_1(y))] - \\ &- V_0 \mu \varepsilon_0^{-1} (\lambda + 2\mu)^{-1} \sin(\omega_0 t + \varphi_1(y)), \\ &U_y(-l, y, t) = 0, \\ &V_x(l, y, t) = \\ &= V_0 [1 + (\varepsilon_{2H} - (\varepsilon_{2H} - \varepsilon_{2k})H^{-1}y) R^{-1} \cos(\omega_0 t + \varphi_2(y))], \\ &U_y(l, y, t) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Результаты расчётов, выполненных на компьютере, при значениях  $\varphi_1(y) = \pi y(2H)^{-1}$ ,  $\varphi_2(y) = \pi y(3H)^{-1}$ ,  $R_1 = R_2 = 13 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $V_0 = 0,76 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $H = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $l = 0,25 \text{ м}$ ,  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{2H} = 10^{-5}$ ,  $\varepsilon_{2k} = 5 \cdot 10^{-6}$ ,  $\lambda = 2596,153 \cdot 10^{-6} \text{ Нм}^{-2}$ ,  $\mu = 1730,769 \cdot 10^{-6} \text{ Нм}^{-2}$  приведены на рис. 3, 4, 5. Найденные значения  $U_x$  в зависимости от  $y$  фактически дают значения амплитуд и фаз перекосов, выраженных в линейных единицах. Нормируя  $U_x$  средней скоростью  $V_0$ , легко перейти к временным единицам, более привычным в инженерных расчётах.

Анализ результатов расчётов позволяет сделать следующие выводы:

1. При значениях параметров, близких к реальным, разложения решений в ряды Фурье сходятся достаточно быстро.
2. Зависимость распределения амплитуд перекосов по ширине МЛ мало отличается от линейной при отсутствии смещений по оси  $y$ .
3. Влияние граничных условий на входе и выходе рассматриваемого участка МЛ не

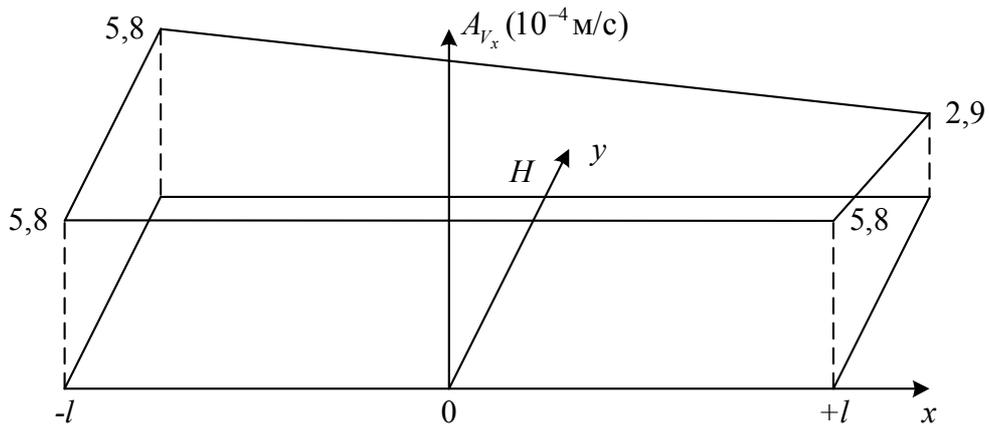


Рис. 3. Изменение амплитуды скорости  $V_x$  около номинальной  $V_0$

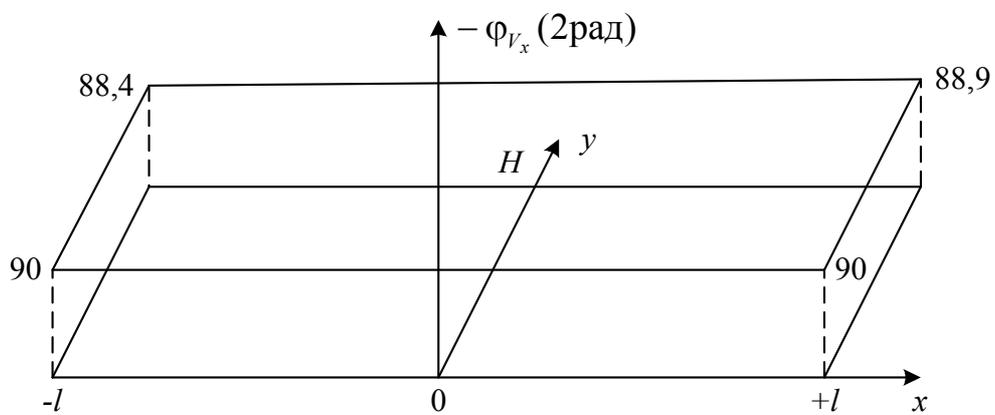


Рис. 4. Изменение фазы скорости  $V_x$

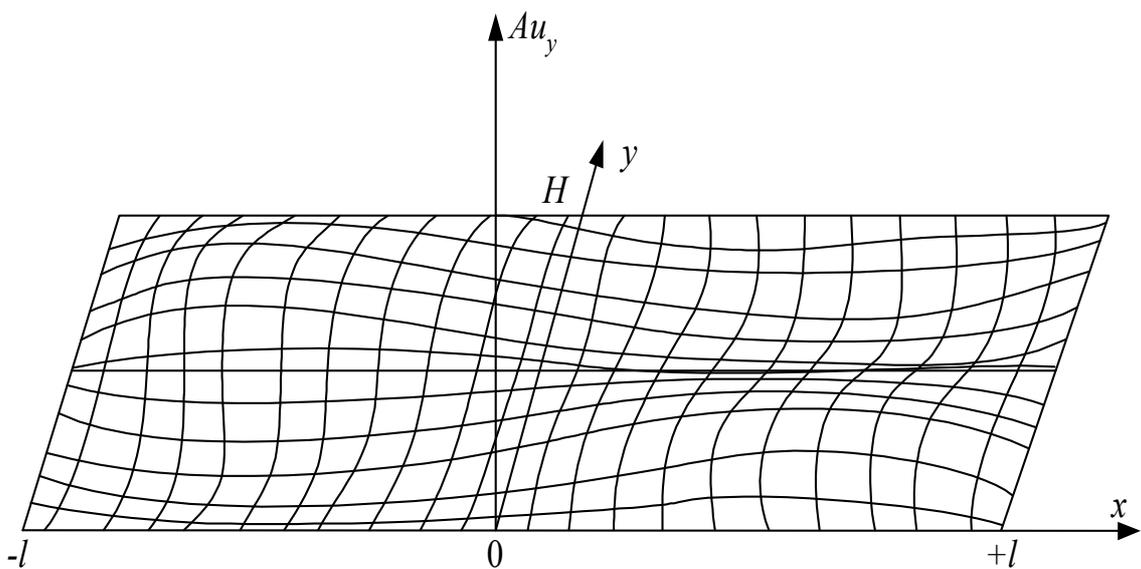


Рис. 5. Изменение амплитуды перемещений  $V_y$  ( $\max |Au_y| = 3,8 \cdot 10^{-4}$  м)

одинаково и совпадает при равной нулю номинальной скорости протягивания МЛ.

4. Полученные результаты дают основание для применения к данному типу задач приближенных методов, основанных на разложениях по системам ортогональных функций (проекционные методы).

#### Библиографический список

1. Варнаускас, П. А. Методы и средства экспериментальных исследований динамики прецизионных лентопротяжных механизмов [Текст] / П. А. Варнаускас, А. И. Куртинайтис, К. М. Рагульскис. – Вильнюс: Мокслас, 1982. – 104 с.

2. Рагульскис, К. М. Динамика прецизионных лентопротяжных механизмов [Текст] / К. М. Рагульскис, Е. В. Лялин, П. А. Варнаускас и др. – Вильнюс: Мокслас, 1984. – 171 с.

3. Норенков, И. П. Телекоммуникационные технологии и сети [Текст] / И. П. Норенков, В. А. Трудоношин. – М.: Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2000. – 248 с.

4. Захаров, В. Г. Уточненная динамическая модель пространственных колебаний магнитных лент [Текст] / В. Г. Захаров, С. П. Севенко. – Техника средств связи. Серия «Общетехническая», 1982.- № 2 (14). – С. 39–43.

## MATHEMATICAL MODEL OF MOVEMENT OF THE TAPE IN STREAMERS IN THE PRESENCE OF THE WARP AND NON-UNIFORMITY OF SPEED OF ITS TRANSPORTATION

© 2011 V. E. Ljalin, V. P. Taranuha

Izhevsk state technical university

Obtained a solution for two-dimensional boundary task of magnetic tape oscillations without considering its mass. In contrast to the previously used controls, the speed of tape pulling and its slip at the entrance to a free area are taken into account.

*A tape warp, streamers, the mechanism of tape transportation.*

#### Информация об авторах

**Лялин Вадим Евгеньевич**, заведующий кафедрой, д.т.н., д.э.н., профессор, интеллектуальные информационные технологии, Ижевский государственный технический университет. E-mail: velyalin@mail.ru. Область научных интересов: информационно-телекоммуникационные системы.

**Тарануха Владимир Прокофьевич**, заведующий кафедрой, к.т.н., доцент, конструирование радиоэлектронной аппаратуры, Ижевский государственный технический университет. E-mail: velyalin@mail.ru. Область научных интересов: системы и устройства хранения данных.

**Lyalin Vadim Evgenievich**, head of department, professor, PhD, intelligent information technology, Izhevsk State Technical University. E-mail: velyalin@mail.ru. Research interests: information and telecommunications systems.

**Taranukha Vladimir Prokof'evich**, head of department, Ph.D., associate professor, design of electronic equipment, Izhevsk State Technical University. E-mail: velyalin@mail.ru. Research interests: systems and storage devices.

## ПЫЛЕУДАРНЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА МИКРОМЕТЕОРИТОВ И ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

© 2011 И. В. Пияков, Д. В. Родин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

В работе рассматривается подход к проектированию пылеударного масс-спектрометра для анализа состава микрометеоритов и частиц космического мусора искусственного и естественного происхождения. Рассмотрены две модели приборов для работы в лабораторных условиях и в космосе. Приведены результаты моделирования и выработаны рекомендации для увеличения разрешающей способности и расширения динамического диапазона исследуемых масс.

*Масс-спектрометр, микрометеорит, космический мусор, тороидальный дефлектор, ионное зеркало, ускоритель пылевых частиц.*

В настоящее время космические аппараты (КА) проектируются на сроки более 5 лет, в связи с чем вопрос прогнозирования деградации материалов и элементов конструкции КА имеет важное значение. Например, длительное воздействие высокоскоростных частиц космического мусора и микрометеороидов способствует уменьшению механической прочности обшивки КА, уменьшению выходной мощности солнечных батарей, загрязнению оптических элементов аппаратуры и т.д.

Времяпролётные масс-спектрометры находят широкое применение не только в земных, но и в космических условиях. К последнему относится изучение космического пространства, химического состава космической пыли, собственной атмосферы космических аппаратов и т.д. Достоинствами времяпролётных масс-спектрометров по сравнению с приборами других принципов действия являются: малые габариты, высокая чувствительность и способность определять состав космических пылевых частиц, имеющих случайный характер взаимодействия с прибором. Последнее свойство особенно важно в области космических исследований.

Для исследования элементного состава космической пыли, микрометеороидов и техногенных частиц широко применяются времяпролётные масс-спектрометры [1]. Приме-

ром такого прибора является масс-спектрометрический преобразователь для исследования космической пыли (рис.1,а). Устройство работает следующим образом. Пылевая частица соударяется с мишенью. За счёт высокой скорости соударения ( $>10$  км/с) вещества частицы и части мишени превращаются в слабоионизованный газ. Ионы ускоряются сеткой 2 и через экранирующий цилиндр 3 попадают в дрейфовый промежуток, где отражаются электростатическим зеркалом 4, а затем зеркалом, образованным сеткой 2 и электродом 5, после чего попадают в приёмники 6. Такая схема предпочтительна при исследовании космических частиц, имеющих малую скорость относительно космического аппарата. Разрешающая способность близка к 100 при общей длине прибора 370 мм [1]. Другой пылегазоударный масс-спектрометр [2] показан на рис.1,б. Устройство работает следующим образом. При ударе частицы о мишень вещества частицы и части мишени превращаются в слабоионизованный газ и на выходе приёмника (ВЭУ-7) образуется ионный спектр. Создание такого прибора с большой площадью чувствительной поверхности является сложной задачей. Импульсы ионов усиливаются усилителем, и при помощи ключа по истечении некоторого времени, необходимого для ионизации, с мишени снимается напряжение, создаваемое

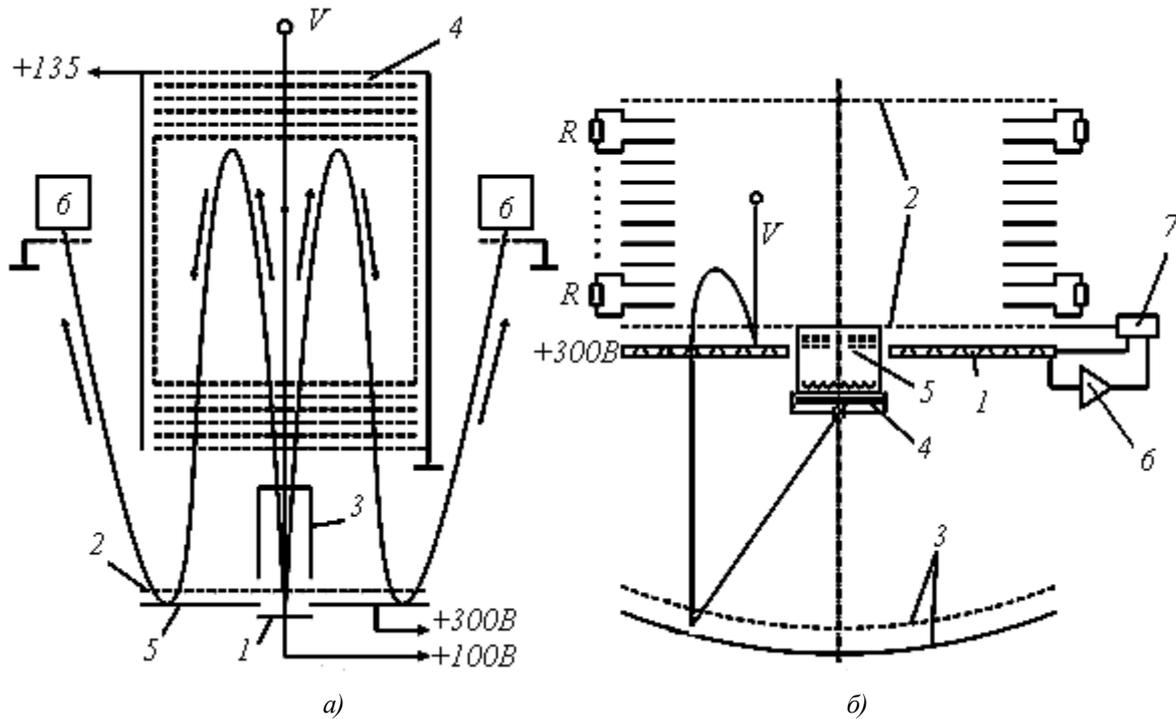


Рис. 1. Пылеударные масс-спектрометры

источником изменяемого во времени импульсного напряжения. Ускоренные ионы вылетают в верхнее бесполое пространство, отражаются иммерсионной линзой таким образом, что фокусируются в центр отражающей сетки, которая направляет их в приёмник ионов. Ионы разделяются по массам во времени, проходя нелинейный отражатель. Сигнал с приёмников ионов поступает в блок обработки ионных спектров. Источник напряжения формирует заданные потенциалы на нелинейном отражателе, отражающей сетке и иммерсионном отражателе.

Особенностью отражающей сетки является то, что она вогнута в сторону мишени с радиусом  $R \approx 2...3$  м. Это способствует дополнительной пространственной фокусировке ионных пучков в приёмники ионов.

Таким образом уменьшаются потери ионов, что способствует увеличению чувствительности устройства. Фокусировка ионов по энергиям производится с помощью иммерсионной линзы и дополнительно в нелинейном отражателе. Использование нелинейного отражателя повышает разрешающую способность устройства.

Некоторые характеристики масс-спектрометров сведены в табл.1.

Как видно из табл. 1, наиболее эффективными способами повышения разрешающей способности являются применение искривлённого электростатического отражателя и ионных зеркал. Сведем эти пути в одном приборе и получим масс-спектрометр, оптическая модель которого показана на рис.2.

Таблица 1. Параметры масс-спектрометров

Особенность прибора	Разрешающая способность	Схема	Литература
Двойная фокусировка	50 – 200	Рис.1	[1]
Ионное зеркало	520 – 530	-	[3]
Вогнутый электростатический отражатель	1000-5000	Рис.2	[2]

Как видно из рис.2, ионное зеркало, находящееся слева, достаточно однородно в пространстве, особенно в центральной части (ближе к оси симметрии прибора). Для электростатического отражателя наблюдается некоторое увеличение в центральной области (в зоне мишени), что вызвано его искривлением. Ускоряющий потенциал в электростатическом отражателе 750 В, максимальный потенциал зеркала 900 В.

Установим в центре мишени источник ионов с распределением Максвелла и термической ионизацией. Траектории ионов показаны на рис.3.

Как видно из рис.3, минимальная энергия ионов наблюдается в момент удара (в центре мишени) и в конце зеркала при их развороте. Частицы преодолевают расстояние от мишени до приёмника ионов (на рис.3 это отверстия в центральном большом кольце) за 358,3 мкс. Проведём подобное моделирование для остальных масс ионов и полученный

результат представим в виде графиков (рис.4). Аналогично построим разницу между временами пролёта масс, отличающихся на 1 а.е.м. (рис.5). Как видно из рис.5, хотя ионы массой 5000 а.е.м. (согласно модели рис.3) и пролетают траекторию от источника к приёмнику, но уже для ионов массой более 700 а.е.м. разница во времени пролёта менее 0,1 мкс.

Таким образом, в данной области спектра элементный анализ затруднен. Однако применение такой модели масс-спектрометра удобно для анализа элементного состава. Недостатком данной конструкции является малая площадь мишени, а при её увеличении длина пролёта ионов зависит от места удара микрометеорита.

Для устранения данных недостатков предложен новый масс-спектрометр [4]. Устройство (рис.6) работает следующим образом.

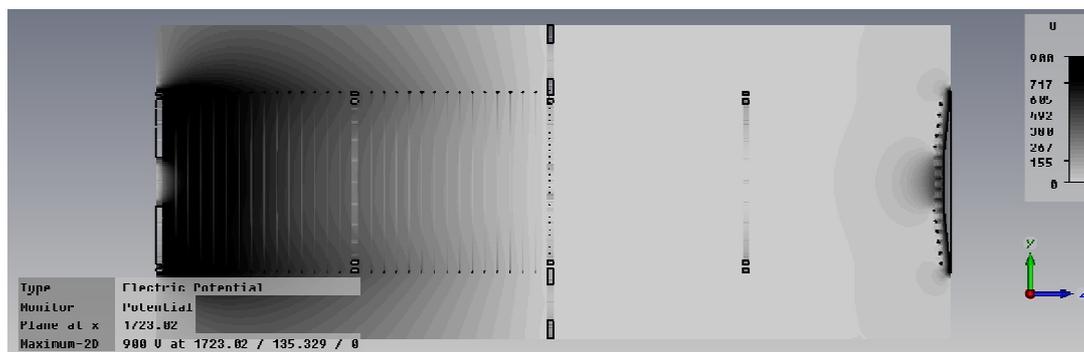


Рис. 2. Оптическая схема масс-спектрометра и распределение электрического потенциала

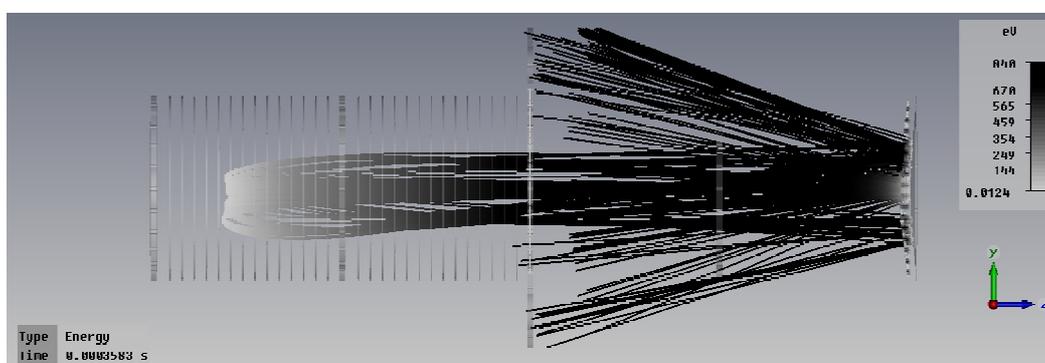


Рис. 3. Траектории частиц массой 5000 а.е.м.

Микрометеорит или пылевая частица соударяется с внутренней стороной полусферической мишени 1 и в результате ударной ионизации превращается в слабоионизированный газ. Под действием электрического поля между полусферической мишенью 1 и полусферической сеткой 2 ионы газа ускоряются в направлении к центру полусферической мишени. В пространстве, ограниченном полусферической сеткой 2 и заземленной сеткой 3, ионы движутся равномерно.

Поскольку фокус параболического отражателя 8 совпадает с центрами полусфери-

ческой мишени 1 и полусферической сетки 2, то расстояние от любой точки поверхности мишени до фокуса параболического отражателя 8 одинаково и все ионы пройдут через фокус параболического отражателя 8, образовав при отражении коллинеарный поток, направленный в отверстие полусферической мишени 1. Далее ионы попадают в один из четырех тороидальных дефлекторов, образованных внутренними отклоняющими электродами 6 и внешними отклоняющими электродами 7 и, пройдя через них, фиксируются приёмниками ионов.

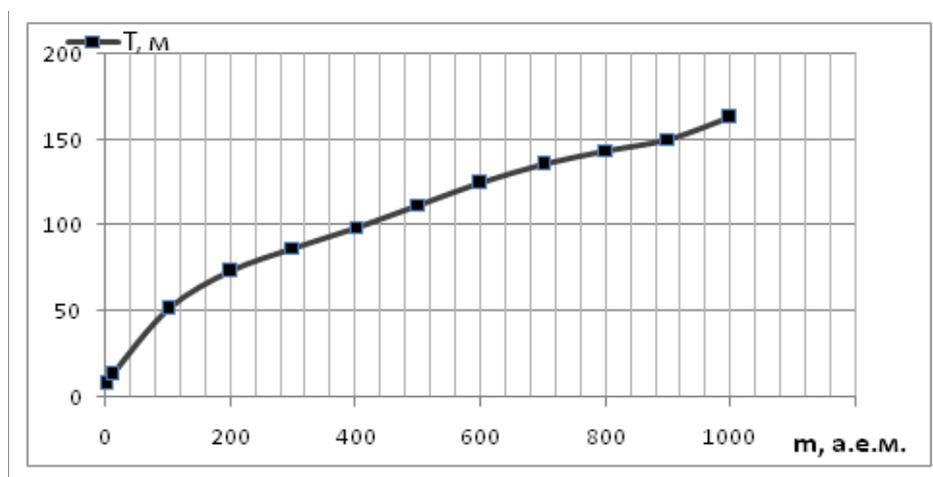


Рис. 4. Зависимость времени пролета от массы ионов

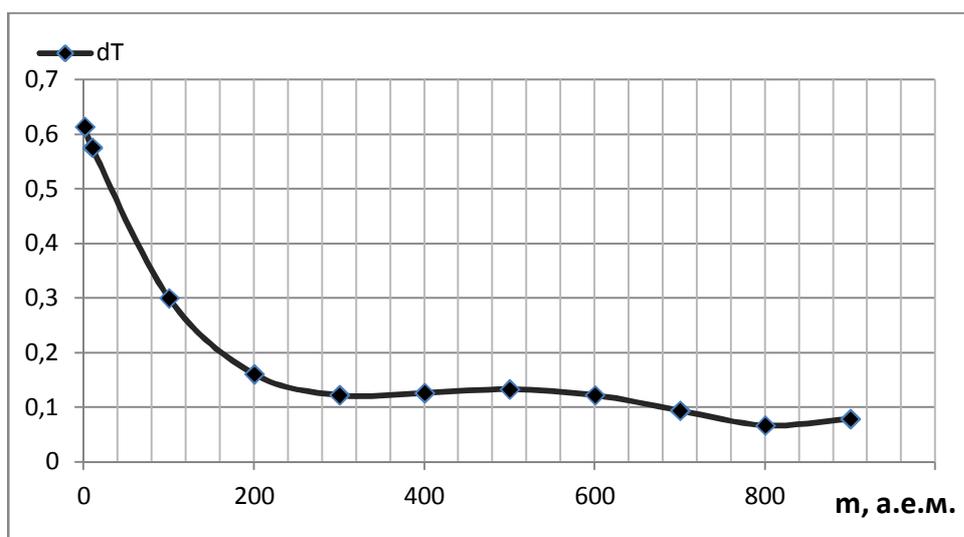


Рис. 5. Разница между временами пролёта масс, отличающихся на 1 а.е.м.

Поскольку ионы проходят сквозь полусферическую мишень 1 одним сфокусированным потоком, большая площадь полусферической мишени 1 является рабочей, что обеспечивает большой коэффициент сбора ионов, а следовательно, увеличивает чувствительность пылеударного масс-спектрометра.

Путь, пройденный ионами от любой точки соударения микрометеорита с полусферической мишенью 1 до одного из приёмников ионов 5, постоянен, что устраняет зависимость результатов измерений от места соударения и обеспечивает увеличение достоверности результатов работы пылеударного масс-спектрометра.

Так как в данной модели ионное зеркало отсутствует, то вместо него использованы тороидальные дефлекторы. Электронно-оптические свойства такой системы схожи с цилиндрическим конденсатором и впервые были рассмотрены Юзом и Рожанским. Анализатор получил название «конденсатор Юза-Рожанского» [5]. Принцип действия зак-

лючается в том, что ионы с большей энергией отклоняются в электрическом поле слабее и движутся по более длинным траекториям. В результате время движения у них больше, чем у ионов с меньшими энергиями.

Ещё одним достоинством этой конструкции является то, что в точке

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{\sqrt{2}}$$

пучок фокусируется в фокальную линию. При повороте на угол  $2\varphi$  происходит фокусировка второго порядка, но при этом частицы фокусируются и по энергии. Для тороидальных дефлекторов данные свойства дополняются дополнительной фокусировкой ионов в пространстве. Точки сборки ионов видны на рис.7.

Из рис.7 видно, что ионы собираются в точку в центре дефлектора и перед выходом. Энергии ионов внутри дефлектора практически не меняются.

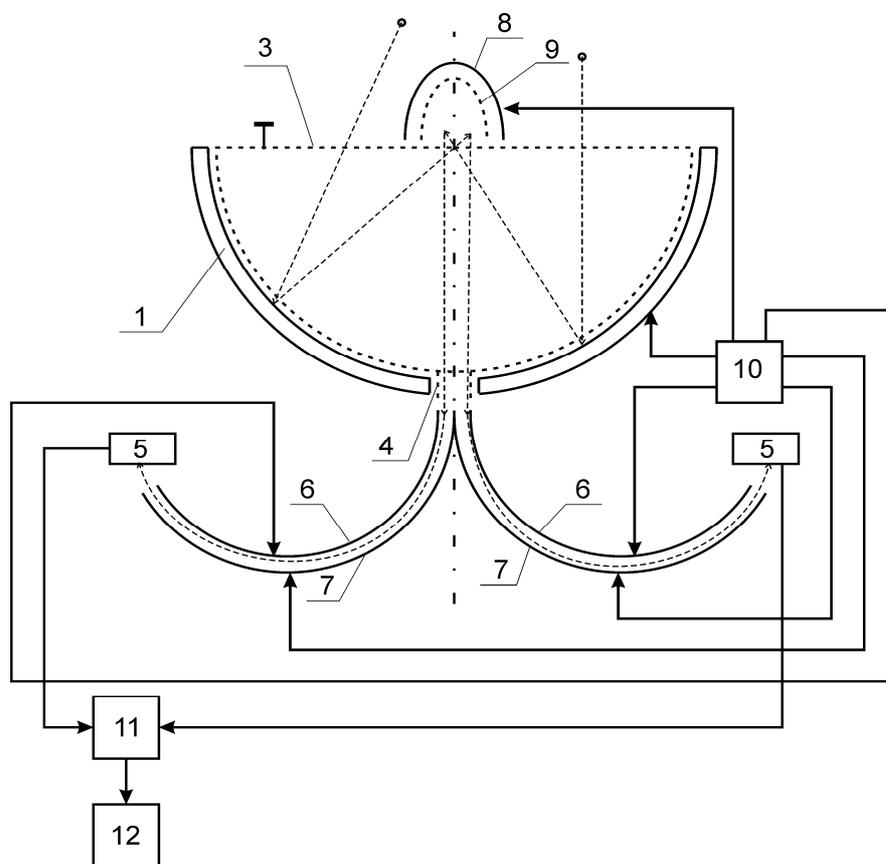


Рис. 6. Структурная схема масс-спектрометра

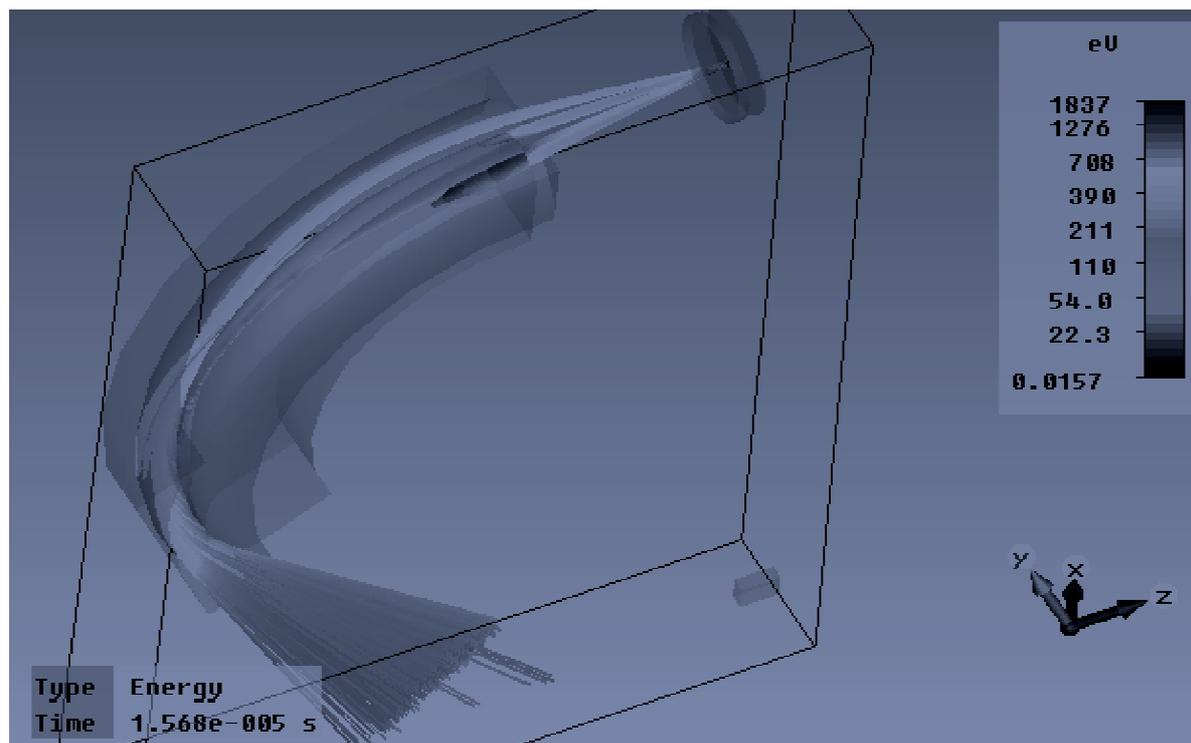


Рис. 7. Траектории ионов в тороидальном дефлекторе

Тороидальные дефлекторы дополнительно фокусируют ионные пакеты, увеличивая разрешающую способность (разрешающая способность достигает 500). К тому же каждый из тороидальных дефлекторов настроен на свой диапазон масс, внутри которого разрешающая способность максимальна. Таким образом удаётся избежать уменьшения разрешающей способности на больших массах. Такое деление диапазона положительно сказывается на увеличении общей разрешающей способности масс-спектрометра.

Настройка тороидальных дефлекторов осуществляется посредством изменения радиусов внешнего и внутреннего электродов и расстояния между ними, а также изменением напряжений на электродах.

Угол  $\varphi$ , исходя из условий фокусировки, вычисляется:

$$\varphi = \arctg \frac{R_{i\delta\delta} + L}{R_{i\delta\delta} L + 1},$$

где  $R_{omp}$  – эффективный радиус линзы,  $L$  – расстояние от выхода тороидального дефлектора до соответствующего приёмника ионов.

На пути усовершенствования масс-спектрометров было предложено множество различных конструкций. Как видно из представленных материалов, в пылеударных масс-спектрометрах применение различных форм отражающих электродов и тороидальных дефлекторов улучшает показатели. Расширение и усовершенствование элементной базы позволяет усложнить электронные модули управления масс-спектрометром, что даёт возможность развивать алгоритмы разделения ионных пакетов во времени.

### Библиографический список

1. Сёмкин, Н. Д. Проектирование масс-спектрометров для космических исследований [Текст] / Н. Д. Сёмкин. – Самара: СГАУ, 2000. – 164 с.
2. Сёмкин, Н. Д. Приборы и техника эксперимента [Текст] / Н. Д. Сёмкин, К. Е. Воронов, С. В. Мясников, Р. А. Помельников. – 2001. – №5. – С. 24 – 32.
3. Пат. 2122257. Российская Федерация, МПК H01J49/40. Пылеударный масс-спектрометр [Текст] / Сёмкин Н. Д., Воронов К. Е.; заявитель и патентообладатель Самар-

ский государственный аэрокосмический университет. –№96103268/09; заявл. 20.02.1996; опубл. 11.20.1998, Бюл. № 9. –9с.

4. Пат. 2326465. Российская Федерация, МПК H01J49/40. Пылеударный масс-спектрометр [Текст] / Сёмкин Н. Д., Пияков И. В., Пияков А. В., Воронов К. Е., Помель-

ников Р. А.; заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет. – №2006125302/28; заявл. 13.07.2006, опубл. 10.06.2008; Бюл. №16. –5с.

5. Козлов, И. Г. Современные проблемы электронной спектроскопии [Текст] / И. Г. Козлов. –М.: Атомиздат, 1978. –215 с.

## DUST-IMPACT MASS-SPECTROMETER FOR DETERMINATION OF ELEMENTAL COMPOSITION OF MICROMETEORITES AND SPACE DEBRIS PARTICLES

© 2011 I. V. Piyakov, D. V. Rodin

Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolev  
(National Research University)

The paper discusses an approach to designing dust-impact mass spectrometer for analyzing the composition of micrometeorites and space debris both natural and artificial origin. Two models of devices for the laboratory and space use are considered. Obtained simulation results and recommendations for resolution increase and dynamic range expansion of the studied masses.

*Mass spectrometer, micrometeors, space debris, the toroidal deflector, ion mirror, the accelerator of the dust particles.*

### Информация об авторах

**Пияков Игорь Владимирович**, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, к.т.н., докторант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [pijakov@mail.ru](mailto:pijakov@mail.ru). Область научных интересов: масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

**Родин Дмитрий Владимирович**, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, инженер института космического приборостроения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [rodin.ssau@mail.ru](mailto:rodin.ssau@mail.ru). Область научных интересов: масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

**Piyakov Igor Vladimirovich**, assistant professor of design and production of radio-electronic means, Ph.D., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [pijakov@mail.ru](mailto:pijakov@mail.ru). Area of research: mass spectrometry, space devices development.

**Rodin Dmitry Vladimirovich**, post-graduate students faculty of radio engineering and medical diagnostic systems, the engineer of the Institute of space device engineering, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [rodin.ssau@mail.ru](mailto:rodin.ssau@mail.ru). Area of research: mass spectrometry, space devices development.

УДК 621.396.6+621.646

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕБИТА ЖИДКОСТИ, НЕФТИ И ГАЗА**

© 2011 К. Ю. Плесовских

Арзамасский политехнический институт (филиал) Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева

Статья посвящена исследованию факторов, влияющих на точность определения дебита жидкости, нефти и газа в нефтегазовой смеси. Описаны факторы, влияющие на получение устойчивого регрессионного описания изменения расхода компонентов газожидкостного потока. Показано, что учёт данных факторов способен существенно повысить точность определения дебита нефти, воды и газа.

*Многокомпонентная смесь, газожидкостный поток, дебит жидкости, устойчивое регрессионное описание, число обусловленности, режим течения потока, системы учёта нефти, аномальные данные.*

Измерение расхода двухфазных веществ имеет свои особенности и трудности, связанные с неомогенностью состава смеси, различием скоростей отдельных фаз, а также их концентрацией и структурой потока.

Как показывают исследования, концентрация отдельных фаз меняется по длине трубопровода, и поэтому измерение мгновенного расхода имеет небольшое практическое значение. В этом случае лишь среднее значение расхода за некоторый интервал времени может правильно характеризовать двухфазный поток. При этом минимальный интервал осреднения зависит от структуры потока.

В свою очередь, структура двухфазного потока зависит от следующих факторов:

- скорости потока;
- диаметра трубопровода;
- расположения трубопровода в пространстве;
- свойств нефти, воды и газа;
- процентного содержания той или другой фазы;
- влажности нефти [1].

Если концентрация одной из фаз мала, образуется дисперсная или пузырьковая структура, при которой капли жидкости (или пузырьки пара) равномерно распределены в паре (или жидкости).

С увеличением доли жидкости начинается расслоение фаз и появляется раздельное течение. При вертикальной трубе жидкость

всё в большей степени располагается в виде кольцевого слоя вдоль стенок, а в средней части ещё сохраняется дисперсионно-капельная структура. Такую переходную структуру называют дисперсионно-кольцевой. При дальнейшем увеличении доли жидкости в смеси наступает полностью расслоенное течение, которое в вертикальной трубе имеет кольцевую структуру, центральная часть заполнена одним паром или газом.

В горизонтальной трубе при расслоенном течении нет кольцевого слоя жидкости. Последняя под действием сил тяжести всё в большей мере опускается вниз и движется по нижней части трубы, а в верхней её части перемещаются пар или газ вместе с ещё не осевшими каплями жидкости. С увеличением скорости потока и одновременным возрастанием доли жидкости на поверхности раздела фаз начинают возникать волновые гребни. Они растут с увеличением скорости и начинают рассеивать на отдельные части поток пара или газа, движущийся в центре вертикальной трубы или в верхней части горизонтальной трубы. Так возникает пробковая или снарядная структура потока.

При дальнейшем росте доли жидкости газовые пробки уменьшаются в размере, переходя частично в мелкие газовые пузырьки. Возникает пузырьково-снарядная структура, которая затем переходит в пузырьковую. В вертикальной трубе пузырьки распределены

равномерно по сечению, а в горизонтальной они движутся в верхней части [1].

В промышленных трубопроводах наиболее распространена пробковая структура потока.

В настоящее время для определения режима потока используются устройства, включающие в себя концентрически ориентированный набор конденсаторных пластин (патент № 2183012). Такие устройства могут быть использованы лишь на отдельных экспериментальных скважинах, а для более широкого использования не пригодны ввиду большой сложности таких устройств.

Замена физических устройств программной реализацией метода автоматического распознавания режимов позволит существенно удешевить измерительную систему и повысить степень её надёжности. Если имеется возможность определить режим течения потока, для него можно построить модель изменения расхода отдельных компонентов на основе уравнения регрессии.

Основная проблема, возникающая при восстановлении регрессии на основе экспериментальных данных, - проблема мультиколлинеарности. Мультиколлинеарность проявляется в сильной корреляции между двумя или более признаками, что затрудняет оценивание параметров модели. Мультиколлинеарность факторов является основной причиной того, что модель имеет значительные погрешности, а в некоторых случаях решаемая задача становится некорректно поставленной и требует специальных методов её решения.

Существует множество методик, позволяющих проверить устойчивость модели, но ни одна из них не является универсальной. Например, для проверки гипотезы об устойчивости результатов может быть использован критерий Уилкоксона, который служит для проверки того, относятся ли две выборки к одной и той же генеральной совокупности, т. е. обладают ли они одним и тем же статистическим признаком [2].

Другим, менее известным, способом является оценка числа обусловленности  $\text{cond}$  матрицы плана эксперимента [3].

Число обусловленности является мерой чувствительности системы линейных уравнений

к погрешностям задания вектора правых частей уравнений:  $Ax = b$ , где  $A$  – определяемая матрица данных;  $b$  – вектор правых частей уравнений;  $x$  – результат решения системы.

В работе [1] показано, что устойчивая модель имеет число обусловленности  $\text{cond}$  порядка 1. При  $\text{cond}$  от 1 до 10 модель имеет хорошую устойчивость, а от 10 до 100 – удовлетворительную устойчивость. При  $\text{cond}$  больше 100 модель имеет неудовлетворительную устойчивость. Следовательно, для повышения точности модели изменения расхода компонентов потока, необходимо разработать метод, приводящий к единице число обусловленности матрицы исходных данных.

Третьим не менее важным фактором, влияющим на точность определения дебита жидкости, нефти и газа, являются данные, вносящие искажения при построении модели. Это могут быть аномальные данные, данные, полученные с большой погрешностью или принадлежащие другим режимам движения потока, но ошибочно отнесённые к режиму, для которого производится построение модели.

Наиболее простым и наглядным способом определения таких значений может являться графический метод. Но, так как изменение расхода компонентов зависит от многих факторов, построение модели будет осуществляться в многомерном пространстве. Для наглядного представления данных необходимо, чтобы графический метод был основан на сжатии размерности признакового пространства. Такое сжатие возможно, так как признаки взаимосвязаны. Для этого может быть использован метод главных компонент.

Пусть дана матрица входных данных  $X$  ( $X_1, X_2, \dots, X_p$ ), где  $X_i$  – признак, влияющий на расход компонента газожидкостного потока, и каждому признаку  $X_i$  в матрице  $X$  соответствует столбец показаний  $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$  датчика информационно-измерительной системы ( $n$  – количество измерений, произведённых информационно-измерительной системой при различных значениях расхода компонента  $y(x_1, x_2, \dots, x_p)$ ). Из матрицы  $X$  выбираются данные, в которых половина факторов имеет одинаковые значения, а данные другой поло-

вины факторов упорядоченно отсортированы.

Вначале проводится нормировка каждого столбца исходных данных, по формуле  $\bar{X}_i = (X_i - X_{is}) / \sigma_i$ , где  $\bar{X}_i$  - нормированное значение элемента столбца;  $X_{is}$  - среднее значение столбца;  $X_i$  - абсолютное значение элемента столбца;  $\sigma_i$  - среднеквадратическое значение столбца.

Затем вычисляется матрица ковариации  $S$ , состоящая из попарных ковариаций элементов столбцов матрицы  $\bar{X}$ , по формуле  $S = \text{cov}(\bar{X}) = M(\bar{X})M(\bar{X})'$ , где  $\bar{X}'$  - транспонированная матрица  $\bar{X}$ ,  $M(\bar{X})$ ,  $M(\bar{X})'$  - математические ожидания соответствующих матриц.

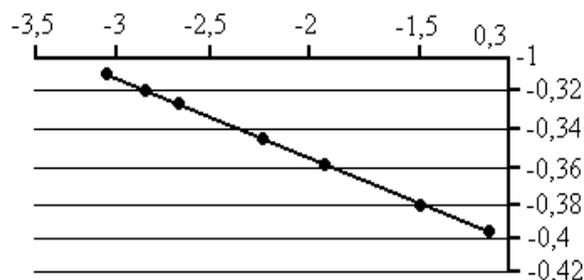
Далее находятся собственные вектора и собственные числа матрицы ковариаций  $S$ , которые позволяют оценить размеры дисперсии и форму её распределения в данных. На два наибольших собственных числа, которым соответствуют два крайних правых собственных вектора матрицы  $V$ , как правило, приходится не менее 80% дисперсии. Поэтому процесс можно описать с помощью первых двух главных компонент, которые рассчитываются по формулам  $Z_1 = \bar{X} \cdot V_n$ ,  $Z_2 = \bar{X} \cdot V_{n-1}$ .

После нахождения главных компонент строится график зависимости первой главной компоненты от второй. Если кривая на графике не имеет ярко выраженных отклонений (рис.1,а), можно считать, что данные не содержат аномальных значений. Точка, содержащая аномальные значения, на графике будет существенно изменять вид кривой (рис. 1, б).

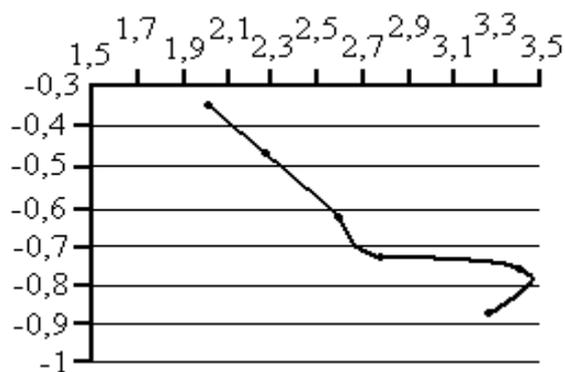
Таким образом, на получение устойчивого регрессионного описания изменения расхода компонентов газожидкостного потока оказывают существенное влияние три фактора:

1. Тип режима течения потока.
2. Число обусловленности матрицы исходных данных.
3. Наличие в экспериментальных данных значений, вносящих искажения при построении модели.

Учёт данных факторов способен существенно повысить точность определения дебита нефти, воды и газа.



а)



б)

Рис. 1

### Библиографический список

1. Абрамов, Г. С. Практическая расходомерия в нефтяной промышленности [Текст] / Г. С. Абрамов, А. В. Барычев. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2002. – 460 с.
2. Вероятностные методы в инженерных задачах : справочник / А. Н. Лебедев, М. С. Куприянов, Д. Д. Недосекин, Е. А. Чернявский. – СПб. : Энергоатомиздат, 2000. – 333 с.
3. Дикусар, В. В. Некоторые численные методы решения линейных алгебраических уравнений [Текст] / В. В. Дикусар // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 9. – С. 111 – 120.

# INVESTIGATION OF FACTORS AFFECTING THE ACCURACY OF THE FLOW RATE OF LIQUID, OIL AND GAS

© 2011 K. Y. Plesovskikh

Arzamas Polytechnical Institute of Nizhny Novgorod State Technical University, R. E. Alekseeva

The article investigates the factors influencing the accuracy of the flow rate of liquid, oil and gas in oil-water mixture. It describes the factors that influence the receipt of sustained regression describe the change in consumption of components of gas-liquid flow. Shown that the inclusion of these factors can significantly improve the accuracy of oil production, water and gas.

*Multicomponent mixture of gas-liquid flow, liquid flow rate, steady regression description, condition number, the stream flow regime, the accounting system of oil, the abnormal data.*

## Информация об авторах

**Плесовских Ксения Юрьевна**, аспирантка кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств, Арзамасский политехнический институт (филиал) Нижегородского государственного технического университета Р. Е. Алексева. E-mail: [kples@mail.ru](mailto:kples@mail.ru). Область научных интересов: методы и алгоритмы обработки данных.

**Plesovskikh Ksenia Yurevna**, post-graduate student department of design and technology of electronic means, Arzamas polytechnic institute (branch) of the Nizhny Novgorod State Technical University R. E. Alekseyev. E-mail: [kples@mail.ru](mailto:kples@mail.ru). Scientific interests: methods and data processing algorithms.

УДК 629.78+621.382.049.77

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА МИКРОСХЕМ

© 2011 С. В. Тюлевин, А. И. Архипов, М. Н. Пиганов, С. В. Елизаров

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Предложена методика оценки результатов обучающего эксперимента и эффективности прогнозных моделей. В качестве основных критериев эффективности предложены вероятности правильных и ошибочных решений, риски потребителя и изготовителя. Проводится анализ эффективности математических моделей прогнозирования параметров качества микросхем КМОП типа, используемых в космической аппаратуре.

*Прогнозирование, показатели эффективности, микросхема, прогнозная модель, обучающий эксперимент, вероятность ошибки.*

### Введение

Современный этап развития радиоэлектроники и телекоммуникационных систем характеризуется обострением проблемы надежности и качества в целом вследствие усложнения радиоэлектронных средств (РЭС), выражающемся как в резком увеличении количества используемых элементов и блоков, в появлении качественно новых ответственных функций, возлагаемых человеком на аппаратуру, так и в расширении условий работы. Аппаратуре различного назначения приходится действовать в условиях интенсификации режимов работы и выполнять различные функции. В силу этих причин повышаются требования к точности и эффективности выполнения заданных функций не только системой в целом, но и каждым отдельным элементом.

В наиболее жестких условиях должна функционировать радиоэлектронная аппаратура (РЭА), установленная на борту ракет-носителей и космических аппаратов.

Наиболее достоверные и полные показатели надежности обычно получают по результатам эксплуатации аппаратуры. Однако эта информация поступает, как правило, с большим опозданием. Традиционные методы испытаний аппаратуры во многих случаях также не позволяют подтвердить заданный уровень ее надежности и качества из-за наличия ряда трудно выявляемых скрытых дефектов. В связи с этим одним из перспективных

направлений в разработке эффективных и экономически приемлемых методов оценки надежности и качества РЭС и электрорадиоизделий (ЭРИ) является прогнозирование их будущего состояния [1,2].

Наибольшую точность обеспечивает индивидуальное прогнозирование (ИП). Его смысл заключается в том, что по величине информативного параметра или по результатам наблюдения за каждым конкретным экземпляром и полученной прогнозной модели делается вывод о потенциальной надежности этого экземпляра, т.е. о возможности его использования по назначению в течение заданного срока службы [3,4].

В работах [5,6] предложены структурные модели ИП показателей качества космических РЭС. Однако они не учитывают этапа оценки эффективности прогнозной модели. Проведенные нами исследования показали важность этого этапа и необходимость разработки методики оценки эффективности.

Цель работы - разработка методики оценки и анализ эффективности прогнозной модели на примере параметров качества микросхем с комплементарной МОП-структурой (КМОП типа).

### Оценка результатов обучающего эксперимента

Пусть мы имеем выборку элементов, в которой  $n$  экземпляров. По результатам обучающего эксперимента мы получили факти-

ческие значения информативного параметра  $U$  и прогнозируемого параметра  $\alpha$ . Будем считать, что  $U$  и  $\alpha$  коррелированы. Тогда с учетом [7] построим поле корреляции (рис.1).

Поясним теперь обозначения на рис. 1:

$n(реш.K_1/K_1)$  – число верных решений об отнесении экземпляра, принадлежащего фактически к классу  $K_1$ , к этому же классу; оно равно числу экземпляров, у которых данным обучающего эксперимента  $U \leq U_{кл}$  и  $\alpha \leq \alpha_{сп}$ ; это годные экземпляры и по прогнозу они также будут отнесены к годным, т.е. к классу  $K_1$ ; здесь  $U_{кл}$  – порог классификации,  $\alpha_{сп}$  – граничное значение прогнозируемого параметра.

$n(реш.K_2/K_2)$  – число верных решений об отнесении экземпляра, принадлежащего фактически к классу  $K_2$ , к тому же классу; оно равно числу экземпляров, у которых  $U > U_{кл}$  и  $\alpha > \alpha_{сп}$ ; это дефектные экземпляры (класс  $K_2$ ), и по прогнозу они будут отнесены к дефектным;

$n(реш.K_1/K_2)$  – число ошибочных решений, заключающихся в отнесении экземпляров класса  $K_2$  в  $K_1$ ; его обозначают также  $n(K_2/реш.K_1)$ , оно равно числу экземпляров, у которых  $U \leq U_{кл}$  и  $\alpha > \alpha_{сп}$ ; это фактически дефектные экземпляры (класс  $K_2$ ), но по прогнозу они будут отнесены к годным (класс  $K_1$ ), так как у них  $U \leq U_{кл}$ ;

$n(реш.K_2/K_1)$  – число ошибочных решений, заключающихся в отнесении экземпляров класса  $K_1$  в  $K_2$ ; его обозначают также  $n(K_1/реш.K_2)$ ; оно равно числу экземпляров, у которых  $U > U_{кл}$  и  $\alpha \leq \alpha_{сп}$ ; это фактически годные экземпляры (класс  $K_1$ ), но по прогнозу они будут отнесены к дефектным (класс  $K_2$ ), так как у них  $U > U_{кл}$ . Обозначим далее  $n(K_1)$ ,  $n(K_2)$  – число экземпляров, фактически принадлежащих к классу  $K_1$  и  $K_2$  соответственно, при этом их сумма равна числу экземпляров, используемых в обучающем эксперименте,  $n(K_1) + n(K_2) = n$ ;

$n(реш.K_1)$ ,  $n(реш.K_2)$  – общее число решений, принимаемых об отнесении экземпляров соответственно к классу  $K_1$  и  $K_2$  по прогнозу, при этом

$$n(реш.K_1) + n(реш.K_2) = n.$$

Для введенных характеристик справедливо соотношение:

$$n(K_1) = n(K_1/реш.K_1/K_1) + n(реш.K_2/K_1);$$

$$n(K_2) = n(K_1/реш.K_1/K_2) + n(реш.K_2/K_2);$$

$$n(реш.K_1) = n(K_1/реш.K_1/K_1) + n(реш.K_1/K_2);$$

$$n(реш.K_2) = n(реш.K_2/K_1) + n(реш.K_2/K_2).$$

Следуя принятым соотношениям, имеем риск потребителя –

$$P_{nm} = P(K_2 / решK_1) = \frac{n(K_2 / решK_1)}{n(решK_1)},$$

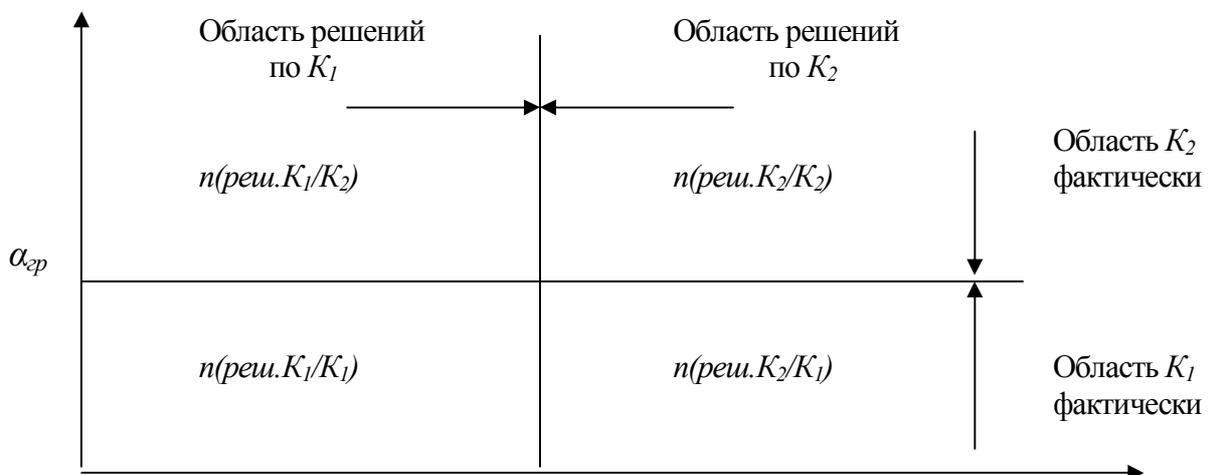


Рис. 1. Поле корреляции

U

риск изготовителя –

$$P_u = P(K_1 / \text{реш}K_2) = \frac{n(K_1 / \text{реш}K_2)}{n(\text{реш}K_1)},$$

условные вероятности принятия ошибочных решений –

$$P(\text{реш}K_1 / K_2) = \frac{n(\text{реш}K_1 / K_2)}{n(K_2)},$$

$$P(\text{реш}K_2 / K_1) = \frac{n(\text{реш}K_2 / K_1)}{n(K_1)},$$

априорные вероятности принадлежности экземпляра к классу  $K_1$  (вероятность оказаться годным любого, наугад взятого экземпляра) –  $P(K_1) = n(K_1)/n$

и к классу  $K_2$  (вероятность оказаться дефектным любого, наугад взятого экземпляра) –  $P(K_2) = n(K_2)/n$ .

Априорные вероятности принятия решений об отнесении экземпляра к классу  $K_1$  –  $P(\text{реш}K_1) = n(\text{реш}K_1)/n$  и к классу  $K_2$  –  $P(\text{реш}K_2) = n(\text{реш}K_2)/n$ .

Если качество прогнозирования необходимо оценить каким-либо одним показателем, учитывающим одновременно ошибки того или другого вида, можно использовать вероятность ошибки

$$P_o = \frac{n(\text{реш}K_1 / K_2) + n(\text{реш}K_2 / K_1)}{n}$$

и вероятность принятия правильных решений (её называют также эффективностью распознавания):

$$P_n = 1 - P_o = \frac{n(\text{реш}K_1 / K_1) + n(\text{реш}K_2 / K_2)}{n}.$$

Значение  $U_{кл}$  должно быть выбрано таким, чтобы вероятности ошибочных решений не превышали заданного допустимого уровня.

Величина порога может быть определена путем просчёта нескольких вариантов и выбором такого  $U_{кл}$ , при котором требования, заданные относительно величин  $P_o$  или  $(K_2/\text{реш}K_1)$ , выполняются. Если этим требованиям не удастся удовлетворить ни при каком значении  $U_{кл}$ , следует попытаться использовать большее число параметров либо найти более информативные параметры.

### Анализ эффективности прогнозных моделей

По результатам обучения были построены прогнозные модели надежности микросхем методами регрессионных и дискриминантных функций в следующем виде:

$$\frac{\Delta I_{\dot{o}\dot{o}}}{I_{\dot{o}\dot{o}}} = -31,35 + 28,46 t_p^+ - 47,26 U_{\dot{o}\dot{o}.i}; \quad (1)$$

$$\dot{I}_a = \frac{\Delta I_{\dot{o}\dot{o}}}{I_{\dot{o}\dot{o}}} + 0,9 t_p^+ + 0,53 U_{\dot{o}\dot{o}.i}, \quad (2)$$

где  $\frac{\Delta I_{ym}}{I_{ym}}$  – дрейф тока утечки (прогнозируе-

мый параметр);  $t_p^+$  – время задержки по переднему фронту импульса на 4-ом выводе микросхемы;  $U_{\dot{o}\dot{o}.i}$  – критическое напряжение питания;  $\Pi_o$  – порог дискриминантной функции.

Проведем исследование и анализ данных моделей и оценим их эффективность по приведенным выше критериям. Во многих случаях достаточно использовать четыре критерия оценки:  $P_n$ ,  $P_o$ ,  $P_u$ ,  $P_{nm}$ . Поэтому проведем анализ по этим критериям.

На рис. 2 приведена зависимость вероятностных характеристик от порога регрессионной модели  $\Pi_p$  для КМОП микросхем. Из рис. 2 видно, что оптимальным порогом регрессионной модели для КМОП микросхем будет  $\Pi_p = 35$ . При этом  $P_o = 0,16$ ;  $P_{nm} = 0,13$ ;  $P_u = 0,2$ . Минимальное значение  $P_{nm} = 0$  будет при  $\Pi_p = 0 \dots 20$ . При этом  $P_o = 0,56 \dots 0,36$ ;  $P_u = 0,58 \dots 0,47$ . Минимальное значение риска изготовителя  $P_u = 0$  будет при  $\Pi_p = 64 \dots 100$ . При этом  $P_o = 0,26 \dots 0,36$ ;  $P_{nm} = 0,3 \dots 0,38$ .

На рис. 3 приведена зависимость вероятностных характеристик от порога дискриминантной функции для того же типа микросхем. Как видно из рис. 3, оптимальным порогом дискриминантной функции будет  $\Pi_g = 18$ , так как при этом значении мы имеем минимальное значение вероятности принятия ошибочных решений  $P_o = 0,16$ . При этом  $P_{nm} = 0,25$ , а  $P_u = 0,12$ . Из этого рисунка следует, что минимальное значение риска изготовителя  $P_u = 0$  будет при  $\Pi_g = 38$ . При этом  $P_o = 0,63$ , а  $P_{nm} = 0,67$ . Минимальное значение риска потребителя  $P_{nm} = 0,25$  соответствует  $\Pi_g = 18$ . При этом  $P_o = 0,16$ , а  $P_u = 0,12$ .

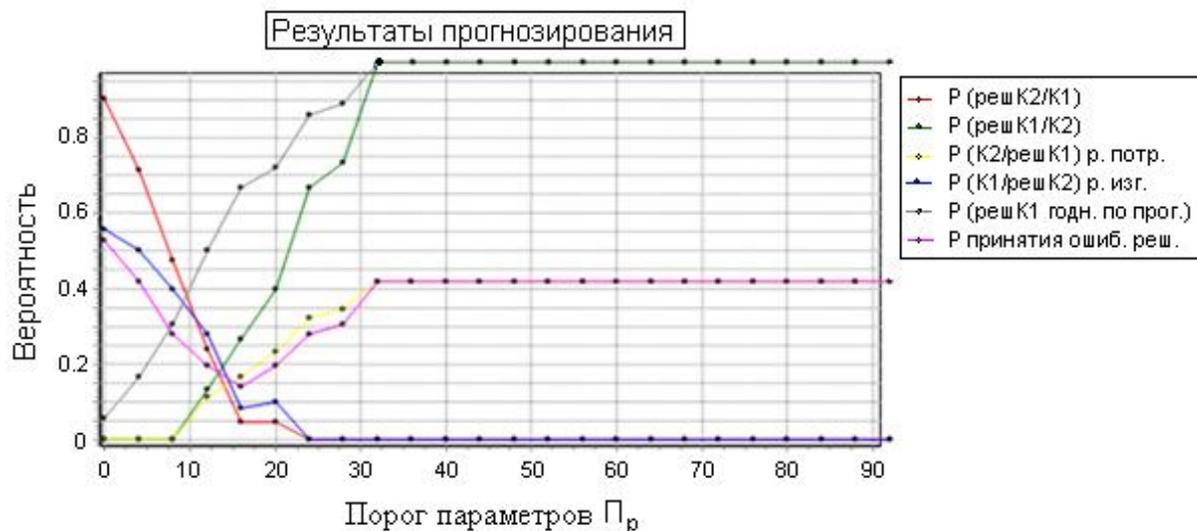


Рис. 2. Влияние порога  $\Pi_p$  на характеристики эффективности прогнозной модели для КМОП микросхем

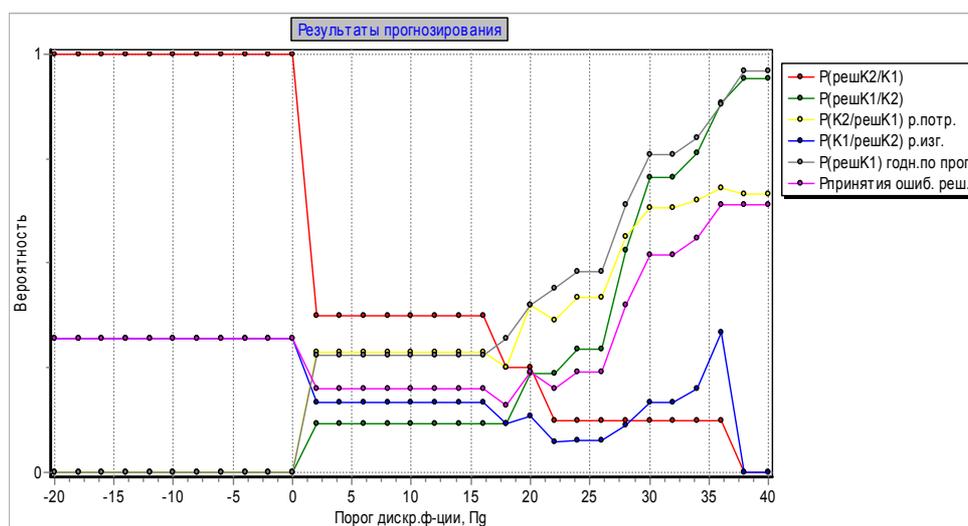


Рис. 3. Влияние порога  $\Pi_d$  на характеристики эффективности прогнозной модели для КМОП микросхем

### Выводы

1. Предложена методика оценки эффективности прогнозных моделей надежности электрорадиоизделий по вероятностным характеристикам.

2. Проведены исследование и анализ прогнозных моделей надежности микросхем КМОП типа и оценена их эффективности. Предложенная методика позволяет снизить риск потребителя до нуля, что важно для космической аппаратуры.

### Библиографический список

1. Кейджян, Г. А. Прогнозирование надежности микроэлектронной аппаратуры на основе БИС [Текст] / Г. А. Кейджян. – М.: Радио и связь, 1987. – 152 с.
2. Гаскаров, Д. В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / Д. В. Гаскаров, Т. А. Голинкевич, А. В. Мозгалевский. – М.: Сов. Радио, 1974. – 224 с.

3. Пиганов, М. Н. Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов и компонентов микросборок [Текст] / М. Н. Пиганов. – М.: Новые технологии, 2002. – 267с.

4. Пиганов, М. Н. Прогнозирование надежности радиоэлектронных средств [Текст] / М. Н. Пиганов, С. В. Тюлевин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2009. - №1 (72). – С. 174-180.

5. Тюлевин, С. В. Структурная модель индивидуального прогнозирования парамет-

ров космической аппаратуры [Текст] / С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2008. - № 1. – С. 92-96.

6. Пиганов, М. Н. Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов микросборок [Текст] / М. Н. Пиганов. – Самара: СГАУ, 1999. – 160 с.

7. Пиганов, М. Н. Технологические основы обеспечения качества микросборок [Текст] / М. Н. Пиганов. – Самара: СГАУ, 1999. – 231 с.

## ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF PREDICTIVE MODELS OF QUALITY PARAMETERS OF THE CHIPS

© 2011 S. V. Tyulevin, A. I. Arhipov, M. N. Piganov, S. V. Elizarov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The paper proposed a method for evaluating the effectiveness of teaching experiments and predictive models. The main performance criteria proposed by the probability of correct and erroneous decisions, the risks of the consumer and the manufacturer. Analysis of the mathematical models effectiveness to predict quality parameters such as CMOS chips was carried out for space instrumentation devices.

*Forecasting, performance, chip, predictive model, the learning experiment, the probability of error.*

### Информация об авторах

**Тюлевин Сергей Викторович**, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, кандидат технических наук, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: надёжность и качество космических радиоэлектронных средств.

**Архипов Александр Иванович**, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: надёжность электронных узлов.

**Пиганов Михаил Николаевич**, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств, доктор технических наук, профессор, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [piganov@ssau.ru](mailto:piganov@ssau.ru). Область научных интересов: надёжность и качество радиоэлектронных средств.

**Елизаров Сергей Викторович**, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: программное обеспечение прогнозирования надёжности электронных узлов.

**Tyulevin Sergei Viktorovich**, assistant professor of design and production of radio-electronic means Ph.D., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: quality and reliability of space-based radio-electronic means.

**Arhipov Aleksandr Ivanovich**, P.G. of design and manufacture of electronic resources Department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: the reliability of electronic components.

**Piganov Mikhail Nikolaevich**, Head of design and manufacture of electronic means, doctor of technical sciences Department, professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [piganov@ssau.ru](mailto:piganov@ssau.ru). Research interests: quality and reliability of radio electronic equipment.

**Elizarov Sergei Nikolaevich**, post-graduate student of design and manufacture of electronic resources Department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: software reliability prediction of electronic components.

УДК 621.382.049

## РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ДИЛА-ГРОУВА ОКИСЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

© 2011 А. А. Айзикович, Ю. П. Демаков

Ижевский государственный технический университет

С использованием математического моделирования в среде Mathcad определены значения кинетических коэффициентов (параметров окисления) в модели Дила – Гроува на основе имеющихся экспериментальных данных для сухого и влажного окисления кремния. Получено удовлетворительное совпадение результатов моделирования с экспериментальными кинетическими кривыми.

*Сухое и влажное окисление, диффузия, параметры окисления, константа скорости реакции, энергия активации, закон Аррениуса, математическое моделирование.*

Окисление полупроводника необходимо для создания на его поверхности защитных тонких и прочных окисных плёнок. В технологии кремниевых интегральных схем плёнки SiO<sub>2</sub> получают искусственным путем. Окисление кремния – одна из самых часто повторяемых технологических операций при производстве современных интегральных схем. Полученная плёнка SiO<sub>2</sub> имеет аморфную структуру. Искусственное окисление осуществляется в потоке сухого или увлажнённого кислорода, пропускаемого через кварцевую трубу, нагреваемую токами высокой частоты. Пластины кремния помещаются в специальной лодочке внутри трубы.

Кинетика процесса окисления описывается моделью Дила-Гроува [1]. Авторы модели исходили из того, что процесс окисления и роста окисной плёнки идёт за счет адсорбции и последующей диффузии кислорода через окисел к поверхности кремния.

Согласно этой модели формула для расчёта толщины слоя окисла на поверхности монокристаллического кремния имеет вид:

$$z_0 = \frac{A}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{4B(t+\tau)}{A^2}} - 1 \right), \text{ м.} \quad (1)$$

В формуле (1) параметры  $A$  и  $B$  рассчитываются по формулам

$$A = 2D \left( \frac{1}{h} + \frac{1}{k} \right) = 2D \frac{h+k}{h \cdot k}, \text{ м;} \quad (2)$$

$$B = \frac{2DC_0}{C_i}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (3)$$

где  $h$  – константа скорости растворения молекул окислителя в слое SiO<sub>2</sub>, м/с;  $k$  – константа скорости химической реакции окисления кремния, м/с;  $D$  – коэффициент диффузии кислорода в растущем окисле, м<sup>2</sup>/с;  $C_0$  – концентрация молекул кислорода в газовой фазе, м<sup>-3</sup>;  $C_i$  – концентрация атомов кремния в слое SiO<sub>2</sub>, м<sup>-3</sup> (для влажного окисления это количество в два раза больше).

Коэффициент  $\tau$  в формуле (1) рассчитывается по формуле

$$\tau = \frac{z_i^2 + A(T) \cdot z_i}{B(T)}, \text{ с}, \quad (4)$$

где  $z_i$  – начальное значение толщины окисла при  $t=0$ ;  $z_i=2$  нм для сухого O<sub>2</sub>,  $z_i=0$  для влажного O<sub>2</sub>.

Возникает задача определения коэффициентов  $A$  и  $B$  в модели Дила-Гроува на основе имеющихся экспериментальных данных.

Представленные в работе [2] экспериментальные кинетические кривые роста плёнок SiO<sub>2</sub> при получении тонких плёнок во влажном кислороде (при парциальном давлении паров воды 8,5·10<sup>4</sup> Па) и сухого окисления кремния в реакторах атмосферного давления ( $P \approx 0,1013$  МПа) показаны на рис. 1,  $a$  и  $b$  соответственно.

Анализ выражения (1), выполненный в [1], показывает, что при малых временах  $t$ , то есть при выполнении условия

$$\frac{4B(t+\tau)}{A^2} \ll 1 \text{ или } t+\tau \ll \frac{A^2}{4B},$$

выражение (1) при разложении в ряд примет вид

$$z_0 \approx \frac{A}{2} \left( 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{4B(t+\tau)}{A^2} - 1 \right) = \frac{B}{A} (t+\tau). \quad (5)$$

Следовательно, для малых времен окисления толщина окисла определяется постоянной скоростью поверхностной реакции и прямо пропорциональна времени окисления.

При больших временах, то есть при выполнении условия

$$\frac{4B(t+\tau)}{A^2} \gg 1 \text{ или } t+\tau \gg \frac{A^2}{4B},$$

выражение (1) примет вид (единицей в скобках пренебрегаем):

$$z_0 \approx \frac{A}{2} \left( \sqrt{\frac{4B(t+\tau)}{A^2}} - 1 \right) = \sqrt{B(t+\tau)}. \quad (6)$$

Таким образом, на начальной стадии окисления толщина оксидной пленки увеличивается со временем по линейному закону (5), а при больших временах окисления зависимость толщины от времени (6) становится корневой.

Имеющиеся экспериментальные данные с учётом соотношений (4)...(6) позволяют рассчитать значения параметров  $A$  и  $B$  модели Дила-Гроува. Моделирование проводилось в среде Mathcad 14.

Коэффициент  $B$  на параболическом участке кинетической кривой можно рассчитать по формуле (6), воспользовавшись кинетическими кривыми, представленными на рис.1,а для больших времён окисления ( $1,8 \cdot 10^4$  с) в атмосфере влажного кислорода (то есть при значении параметра  $\tau=0$ ).

На рис. 2 представлена температурная зависимость параметра  $B=f(1/T)$ , построенная в полулогарифмических координатах для температур 900, 1000 и 1100 °С. Представляется естественным, что параметр  $B$  зависит от температуры по закону Аррениуса:

$$B = B_0 e^{-\frac{W_B}{kT}}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (7)$$

где  $B_0$  – начальный коэффициент, являющийся характеристикой параметра при  $T=\infty$ ;  $W_B$  – энергии активации процесса, эВ;  $k=8,6173 \cdot 10^{-5}$  эВ/К – постоянная Больцмана;  $T$  – температура процесса окисления, К;  $e=2,7183$  – основание натурального логарифма.

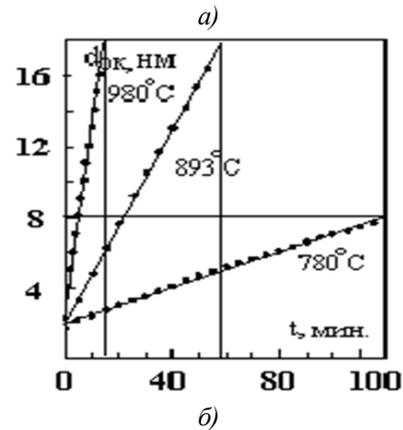
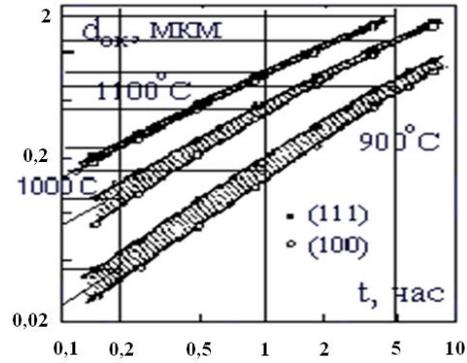


Рис. 1. Кинетика роста плёнок двуокиси кремния [2]:  
а – толстых (в атмосфере влажного кислорода);  
б – тонких (сухое окисление)

Согласно литературным данным [3], энергия активации  $W_B$  константы скоростей параболического участка при влажном и сухом окислении составляют 0,78 эВ и 1,23 эВ соответственно. Однако использование этих параметров не позволяет получить удовлетворительную аппроксимацию результатов, приведённых на рис.1, а и б.

В нашем случае хорошие результаты при аппроксимации получаются при использовании данных [4], согласно которым энергия активации  $W_B$  процесса термического окисления кремния при атмосферном давлении составляет около 40 ккал/моль, то есть 1,735 эВ. При этом значение коэффициента  $B_0$  составило  $(5,16 \pm 01) \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с. Значение коэффициента  $A_B$  при «влажном» окислении рассчитывалось по формуле (4), справедливой для малых времён окисления.

В этом случае по кинетическим кривым на рис.1,а предварительно определялись значения константы скорости линейного участка  $X_B=B/A_B$  при малых временах окисления,

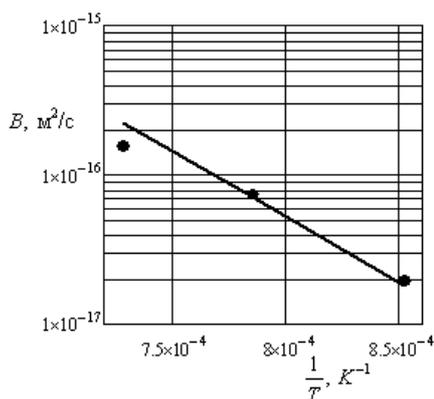


Рис. 2. График зависимости  $B = f(T)$ :  
● – эксперимент, — расчет

составляющих 360 с, а затем рассчитывались значения параметра  $A_B$ . Параметр  $X$  зависит от температуры по закону Аррениуса:

$$X = X_0 e^{\frac{W_X}{kT}}, \text{ м/с},$$

где  $X_0$  – начальный коэффициент, являющийся характеристикой параметра при  $T=\infty$ ;  $W_X$  – энергия активации процесса, эВ.

Значения коэффициентов  $X_0$  и  $W_X$  для расчёта параметра  $X$  при различных условиях окисления приведены в табл. 1.

Величина параметра  $A_B$  при влажном окислении растёт с температурой по закону Аррениуса:

$$A_a = 2,42 \cdot 10^{-6} e^{\frac{0,22}{kT}}, \text{ м}.$$

При температурах окисления 900...1100 °С значение параметра  $A_B$  возрастает от 0,27 до 0,37 мкм.

Аналогичным образом определялось значение параметра  $A_C$  в случае окисления в атмосфере сухого кислорода. В этом случае использовались кинетические кривые рис. 1,

$\bar{b}$ , полученные при температурах 780, 893 и 980 °С.

В отличие от «влажного» при «сухом» окислении значение параметра  $A_C$  практически не зависит от температуры и в диапазоне рабочих температур 780...980 °С его значение составляет  $3,3 \pm 0,3$  мкм. Лучшая аппроксимация достигается в предположении слабого роста параметра  $A_C$  с температурой  $T$  по линейному закону:

$$A_c = 9,6 \cdot 10^{-7} + T \cdot 2,0 \cdot 10^{-9} \text{ м},$$

хотя эта оценка является статистически незначимой.

Из формулы (3) можно рассчитать значение коэффициента диффузии кислорода в двуокиси кремния по формуле

$$D = \frac{B}{2(C_0/C_i)}, \text{ м}^2/\text{с}. \tag{8}$$

Значения коэффициентов  $B_0$ ,  $A_0$ ,  $X_0$  и  $W$  для расчёта параметров  $A$  и  $B$  при той или иной температуре, полученные в результате анализа графиков, приведенных на рис. 1, а и б, представлены в табл. 1.

На рис. 3 представлены кинетические кривые окисления кремния, полученные в результате подстановки параметров  $A(T)$ ,  $B(T)$  из табл. 1 в выражение (1).

Значение параметра  $\tau$  при сухом окислении рассчитывалось по формуле (4).

Температурная зависимость  $\tau(T)$  для сухого окисления подчиняется соотношению  $\tau(T) = 5,246 \cdot 10^9 \exp(-0,014 \cdot T)$ , где  $\tau$  принимает значения 2300...120 с в диапазоне температур 780...980 °С соответственно.

Таблица 1. Параметры окисления кремния

Параметр	Величина	Влажный (в присутствии H <sub>2</sub> O)	Сухой (O <sub>2</sub> )
Константа скорости параболического участка, $B$ , м <sup>2</sup> /с	$B_0$ , м <sup>2</sup> /с	$5,16 \cdot 10^{-10}$	$5,16 \cdot 10^{-10}$
	$W_B$ , эВ	1,735	1,735
Константа скорости линейного участка, $X$ , м/с	$X_0$ , м/с	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$6,93 \cdot 10^{-5}$
	$W_X$ , эВ	1,20	1,64
Константа линейного участка, $A$ , м	$A_0$ , м	$2,42 \cdot 10^{-6}$	$9,5 \cdot 10^{-7}$
	$W_A$ , эВ	0,22	$a = 2 \cdot 10^{-9}$ м/с

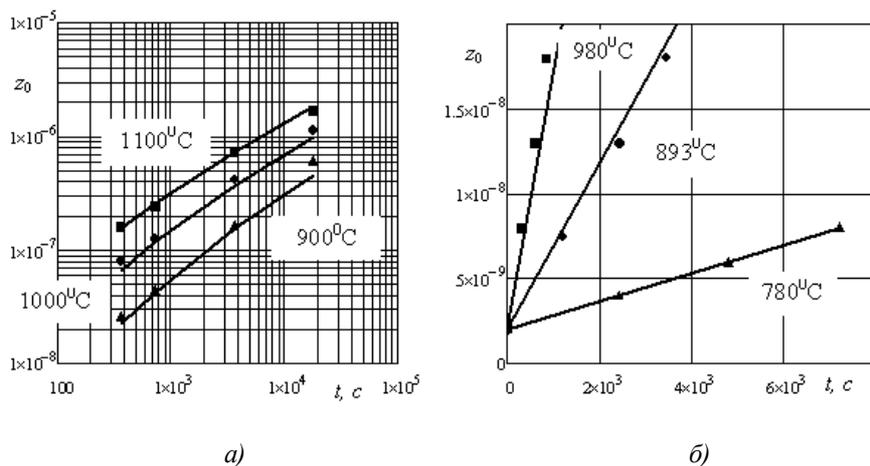


Рис. 3. Результаты моделирования кинетики роста плёнок двуокиси кремния:  
 а – в атмосфере влажного кислорода; б – при сухом окислении.  
 На графике: точки – экспериментальные результаты, линии – расчётные кривые

### Библиографический список

- Deal, B. E., Grove A. S. General Relationship for the Thermal Oxidation of Silicon // Journal of Applied Physics, 36 (12): 3770–3778p.
- Термическое окисление кремния. URL: [http://dssp.petsu.ru/~KOF/OLD/phys/spesh/vlsi/okistern\\_a.html#oborud](http://dssp.petsu.ru/~KOF/OLD/phys/spesh/vlsi/okistern_a.html#oborud) (дата обращения: 04.05.2011).
- Richard, C. Jaeger Thermal Oxidation of Silicon // Introduction to Microelectronic Fabrication. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.
- Гаврилов, Р. А. Технология производства полупроводниковых приборов [Текст] / Р. А. Гаврилов, А. М. Скворцов. – Л.: Энергия, 1968. – 240с.

## CALCULATION OF PARAMETERS OF THE DEAL – GROVE MODEL FOR THE OXIDATION OF SILICON

© 2011 A. A. Aizikovich, Yu. P. Demakov

Izhevsk State Technical University

By means of mathematical modeling with the use of Mathcad software kinetic coefficients in the Deal - Grove model are determined on the basis of available experimental data for the dry and damp oxidation of silicon. A satisfactory agreement between the results of the modeling and experimental kinetic curves is obtained.

*Dry and damp oxidation, diffusion, parameters of oxidation, reaction rate constant, activation energy, Arrhenius's law, mathematical modeling.*

### Информация об авторах

**Айзикович Александр Аркадьевич**, заведующий кафедрой прикладной математики и информатики, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики и информатики, Ижевский государственный технический университет. E-mail: [pmi@istu.ru](mailto:pmi@istu.ru). Область научных интересов: математическое моделирование в радиотехнике.

**Демаков Юрий Павлович**, декан приборостроительного факультета, кандидат физико-математических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет. E-

mail: [pribor@istu.ru](mailto:pribor@istu.ru). Область научных интересов: физика полупроводников и диэлектриков, микроэлектроника.

**Aizikovich Alexander Arkadjevich**, head of the department of applied mathematics and computer science, physics and mathematics, associate professor, head of the department of applied mathematics and computer science, Izhevsk State Technical University. E-mail: [pmi@istu.ru](mailto:pmi@istu.ru). Area of research: mathematical modeling in radio engineering.

**Demakov Yury Pavlovich**, dean of faculty instrument, candidate of physical and mathematical sciences, Izhevsk State Technical University. E-mail: [pribor@istu.ru](mailto:pribor@istu.ru). Area of research: physics of semiconductors and dielectrics, microelectronics.

## ОБУЧАЮЩИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ

© 2011 И. Ю. Шумских, С. В. Тюлевин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Приведена методика обучающего эксперимента при прогнозировании надежности и качества межсоединений электронных узлов на основе новых перспективных паяльных паст. Рассмотрены вопросы контроля информативных и прогнозируемых параметров. Получены экспериментальные данные по уровням этих параметров.

*Обучающий эксперимент, прогнозирование, качество и надежность, паяные соединения, паяльные пасты, электронные узлы, испытания.*

### Введение

Качество и надежность радиоэлектронной аппаратуры зависит от многих факторов, в том числе от качества паяных соединений. Особую остроту вызывает этот вопрос при поверхностном монтаже BGA, NB-BGA, MC-BGA и чип-компонентов с малыми размерами [1]. Следовательно, для достижения высококачественного производства с высоким уровнем выхода годных изделий необходимым условием является повышение надежности паяных соединений выводов компонентов с контактными площадками печатных плат. При этом целесообразно прогнозировать изменение свойств и параметров паяных соединений после монтажа, а также возможность использования аппаратуры по окончании указанного или назначенного срока службы. Для космической аппаратуры наибольшую эффективность дает индивидуальное прогнозирование [2,3]. Наиболее ответственным этапом прогнозирования является обучающий эксперимент [4]. Он определяет точность прогнозной модели и достоверность последующего рабочего прогнозирования.

Обучающий эксперимент – это испытание в заданном режиме определенного количества изделий в течение требуемого времени, обычно равного времени последующего прогнозирования  $t_{пр}$ , и определение фактического состояния каждого экземпляра выборки к моменту окончания испытания. Цель

обучающего эксперимента состоит в получении необходимого массива исходных данных, т.е. такого массива, который требуется для последующего обучения [5]. Методические основы обучающего эксперимента для электрорадиоизделий и электронных узлов космических радиоэлектронных средств (РЭС) разработаны слабо. Экспериментатор ориентируется, в основном, на свой опыт и интуицию. В работе [6] предпринята попытка решения этого вопроса. Предложена общая методика обучающего эксперимента, которая включает семь этапов: анализ конструктивно-технологических особенностей электрорадиоизделий (ЭРИ) и РЭС; разработка или уточнение схем включения для контроля их работоспособности и измерения основных параметров; выбор методов и средств контроля информативных параметров; определение объема выборки; разработка программы исследовательских испытаний; проведение исследовательских испытаний и экспериментов; анализ результатов испытаний и экспериментов. При этом наиболее ответственными являются 5 и 6-ой этапы: «разработка программы исследовательских испытаний» и «проведение исследовательских испытаний и экспериментов». Эти этапы подробно разработаны для микросхем серии 286. Для других типов ЭРИ они разработаны очень слабо, а для печатных узлов и паяных соединений не рассматривались.

Целью данной работы является разработка и апробация методики обучающего эксперимента паяных соединений поверхностно монтируемых узлов космической аппаратуры.

#### **Анализ параметров паяльных паст**

Подавляющее количество дефектов возникает на этапе нанесения паяльной пасты. Это значит, что характеристикам используемой паяльной пасты и самому процессу нанесения паяльной пасты необходимо уделять большое внимание [7].

Экспериментальные исследования показали, что перспективными являются паяльные пасты Cobalt XF3+ и Indium NC-SMQ92J. Они и были выбраны для обучающего эксперимента.

В качестве информативных параметров были выбраны вязкость, клейкость и кислотное число. Это предварительный выбор. Правильность этого выбора может подтвердить только обучающий эксперимент. В качестве прогнозируемого параметра было выбрано поверхностное сопротивление изоляции полученного паяного соединения.

#### **Обучающий эксперимент**

Для проведения обучающего эксперимента необходимо выбрать методы и средства контроля информативных параметров. В связи с тем, что исследуемые пасты поставляются из стран Западной Европы, выберем для контроля методики, приведенные в стандартах IPC-9201, J-STD-008 и Bellcore GR-78-CORE [8].

Контроль вязкости было предложено проводить при температуре  $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Клейкость пасты – это ее способность удерживать компонент на печатной плате. При этом сила крепления компонентов должна оставаться постоянной в течение некоторого времени. Таким образом, клейкость определяет способность пасты удерживать SMD-компоненты на своих местах после установки их на печатную плату и до пайки. Это свойство является индикатором того, подошло ли к концу время жизни пасты.

Тест клейкости предложено проводить по методу 2.4.44 стандартов IPC-TM-650,

IPC/EIA J-STD-005. Он предусматривает применение стандартного тестера, измеряющего силу, необходимую для сдвига компонента определенного веса с площадки пасты определенного размера (6,3 мм и высоты 0,25 мм). Тестовый пробник двигается со скоростью  $2,5 \pm 0,5$  мм/мин и приводится в соприкосновение с компонентами. При этом в течение 5 секунд к компоненту прикладывается сила  $300 \pm 30$  г. Далее проводится сдвиг компонента с площадки с указанной скоростью и измеряется потребная для этого сила. Производится несколько измерений через определенные промежутки времени после нанесения пасты. Данные представляются в виде графика зависимости усилия сдвига от времени. По графику определяется время, обозначенное как время удержания («tick life» либо «tack time»), по истечении которого сила сдвига уменьшается на 20%. Пиковая сила определяет собой удерживающую способность в граммах и обозначается в характеристиках пасты как «tackiness» либо «tack force» (типичное значение: 30...50 г). Обычно это значение относится к начальной клейкости, измеренной непосредственно после нанесения пасты («initial tackiness»).

Понятие поверхностного сопротивления изоляции определено в стандарте IPC 9201 как «электрическое сопротивление между двумя проводниками, разделенными какими-либо диэлектрическими материалами». Оно базируется на концепции поверхностного сопротивления слоя, но также содержит элементы объемной проводимости, токов утечки через электролитические загрязнители, многослойные диэлектрические материалы, материалы металлизаций и воздух.

Поверхностное сопротивление изоляции рекомендуется определять с помощью SIR-тестов. Такие тесты являются главным способом определения влияния флюсов на коррозионную стойкость печатных узлов. Как уже указывалось, наиболее часто используемые методы тестирования описаны в стандартах J-STD-008 и Bellcore GR-78-CORE. Условия проведения тестов традиционно включают повышенную температуру, влажность, напряжение смещения и использование специальных тестовых плат с гре-

бенчатой структурой проводников. Критерием успешного прохождения теста является достаточно высокое поверхностное сопротивление изоляции и незначительные признаки коррозии или образования дендритов.

### Результаты контроля

Результаты контроля информативных параметров и прогнозируемого параметра для двух типов паяльных паст приведены в табл. 1 и 2. Затем проводятся исследовательские испытания паяных соединений. Условия их проведения приведены в табл. 3. Режимы испытаний выбраны с учетом обеспечения максимальной деградации паяных соединений.

По результатам испытаний выявляются уровень деградации, виды отказов, их механизмы; определяются факторы, ускоряющие деградацию. По их результатам мы окончательно выбираем информативные параметры, которые будут использованы для построения прогнозной модели. Кроме того, они дают информацию о запасах устойчивости паяных соединений, резервах их качества, недостатках методики испытаний.

Анализ результатов испытаний и проведенных экспериментов будет приведен в следующей работе авторов.

Таблица 1. Параметры пасты Cobar XF3+

№ п/п	Поверхностное сопротивление изоляции, $10^9$ Ом	Вязкость, Па·с	Клейкость, г	Кислотное число, мг КОН
1	1,5	202	112	124
2	0,7	158	96	117
3	1,2	199	110	124
4	1,1	184	106	126
5	0,7	241	91	113
6	2,6	210	112	123
7	0,5	224	114	102
8	2,1	205	112	123
9	1,7	200	111	124
10	1,3	195	109	124
11	1,1	183	106	125
12	1,1	161	100	128
13	0,9	190	106	120
14	2,1	213	112	123
15	1,2	191	107	126
16	1,1	238	100	126
17	2,3	210	112	123
18	2,5	212	113	123
19	0,9	185	106	119
20	2,8	225	114	122
21	2,4	208	112	123
22	0,5	231	116	115
23	2,2	205	111	124
24	1,9	196	110	124
25	2,2	210	112	123

Таблица 1. Окончание

№ п/п	Поверхностное сопротивление изоляции, $10^9$ Ом	Вязкость, Па·с	Клейкость, г	Кислотное число, мг КОН
26	0,5	238	117	111
27	1,2	198	111	124
28	2,3	213	112	123
29	1,5	196	109	124
30	0,5	245	90	110
31	0,7	239	95	115
32	1,2	181	105	126
33	0,3	242	92	109
34	1,5	201	112	124
35	1,5	200	112	124
36	0,8	231	104	119
37	1,2	195	109	125
38	2,2	210	112	123
39	0,9	227	105	120
40	2,1	211	112	123
41	0,8	229	104	117
42	0,7	233	102	115
43	1,3	195	108	124
44	2	204	111	123
45	0,5	230	104	113
46	2,2	220	114	122
47	2	215	112	123
48	0,9	229	114	119
49	1,5	199	110	124
50	1	192	105	120

Таблица 2. Параметры пасты Indium NC-SMQ92J

Класс годности	Поверхностное сопротивление изоляции, $10^9$ Ом	Вязкость, Па·с	Клейкость, г	Кислотное число, мг КОН
1	1,5	202	112	124
2	0,7	158	96	117
3	1,2	199	110	124
4	1,1	184	106	126
5	0,7	241	91	113
6	2,6	210	112	123
7	0,5	224	114	102
8	2,1	205	112	123
9	1,7	200	111	124

Таблица 2. Окончание

Класс годности	Поверхностное сопротивление изоляции, $10^9$ Ом	Вязкость, Па·с	Клейкость, г	Кислотное число, мг КОН
10	1,3	195	109	124
11	1,1	183	106	125
12	3,2	190	36	113
13	2,5	194	37	112
14	0,8	204	42	107
15	3,2	187	36	113
16	2,6	179	35	113
17	0,5	211	45	100
18	3,0	169	35	113
19	3,2	185	36	113
20	3,6	192	37	112
21	0,8	207	43	107
22	3,1	184	36	113
23	0,8	201	41	108
24	3,5	193	37	113
25	2,8	168	35	113
26	3,5	187	36	112
27	0,9	200	40	109
28	2,9	192	37	112
29	0,5	212	46	101
30	0,7	205	44	106

Таблица 3. Состав и режимы операций при входном контроле паяльных паст

№ п/п	Наименование операции	Оснастка, оборудование, материалы	Режимы
1	Подготовка паяльной пасты, измерение вязкости	1. Устройство SPS-1. 2. Спиральный вискозиметр РМ-2А. 3. Паяльная паста.	Сушка: $t^0=(25\pm 5)^0\text{C}$ , $\tau=30$ мин; $V_1=30$ об/мин; $V_2=10$ об/мин.
2	Контроль усадки	1. Устройство DEK248V. 2. Трафареты IPC-A-20-2 шт. 3. ПП IPC-A-20-2 шт. 4. Термокамера VCL7010. 5. 9346-0020 емкость под спирт. 6. Безворсовые салфетки – 2 шт. 7. Антистатическая тара СО-41 с крышкой СО-41 Lid – 1 шт. 8. Микроскоп Mantis Elite. 9. Х/б перчатки (или антист. перчатки) – 1 пара. 10. Неметаллический шпатель.	1) $t^0=(25\pm 5)^0\text{C}$ , $\tau=20$ мин, влажность $(50\pm 10)\%$ ; 2) $t^0=(115\pm 5)^0\text{C}$ , $\tau=15$ мин; 3) $t^0=(25\pm 5)^0\text{C}$ , $\tau=15$ мин.

Таблица 3. Окончание

№ п/п	Наименование операции	Оснастка, оборудование, материалы	Режимы
3	Испытание на образование шариков припоя	1. Подложка из корундового стекла 1ПК1 Ц7.817.000-22 – 4 шт. 2. Рейсфедер – 1 шт. 3. 9346-0020 ёмкость под спирт. 4. Безворсовые салфетки – 2 шт. 5. Микроскоп Mantis Elite. 6. Антистатическая тара СО-41 с крышкой СО-41 Lid – 1 шт. 7. Термокамера VCL7010. 8. Печь VP6000. 9. Ванна для лужения НАККО FX-301.	1) $t^0=200(230)^0C$ ; 2) ETR=100; 3) $t^0=(25\pm 5)^0C$ , $\tau=4$ часа $\pm 15$ мин.
4	Испытание на паяемость (смазываемость) паяльной пасты	1. ПП IPC-A-21, IPC-A-20 – по 1 шт. 2. Устройство DEK248V. 3. Печь VP6000. 4. Трафарет IPC-A-21, IPC-A-20. 5. Антистатическая тара СО-41 с крышкой СО-41 Lid – 1 шт. 6. Микроскоп Mantis Elite. 7. Неметаллический шпатель.	1) метод 2.4.45 IPC-TM-650.
5	Испытание на сопротивление поверхностной изоляции	1. Трафарет IPC-B-25A – 1 шт. 2. ПП IPC-B-25A – 1 шт. 3. 9346-0020 ёмкость под спирт. 4. Безворсовые салфетки – 2 шт. 5. Антистатическая тара СО-41 с крышкой СО-41 Lid – 1 шт. 6. Устройство DEK248V. 7. Печь VP6000. 8. Тераомметр E6-13A. 9. Термокамера VCL7010. 10. Неметаллический шпатель.	1) $t^0=(25\pm 5)^0C$ , $\tau=1$ сек; 2) $t^0=65^0C$ , влажность 60%, $\tau=1$ час; 3) $t^0=65^0C$ , влажность 98%, $\tau=5$ часов; 4) $t^0=65^0C$ , влажность 98%, $\tau=15$ часов.
6	Испытание на коррозионное воздействие флюсов	1. Трафарет IPC-B-25A – 1 шт. 2. ПП IPC-B-25A – 1 шт. 3. 9346-0020 ёмкость под спирт. 4. Безворсовые салфетки – 2 шт. 5. Устройство DEK248V. 6. Термокамера VCL7010. 7. Тераомметр E6-13A. 8. Неметаллический шпатель.	1) $t^0=(25\pm 5)^0C$ , $\tau=20$ мин; 2) $t^0=85^0C$ , влажность 85%, U=50 В, $\tau=24$ часа; 3) $t^0=85^0C$ , влажность 85%, U=50 В, $\tau=96$ часов; 4) $t^0=85^0C$ , влажность 85%, U=50 В, $\tau=168$ часов.
7	Определение кислотного числа	1. Титрометрический набор. 2. Гидроксид калия. 3. Деионизированная вода. 4. Фенолфталеин.	1) стандарт IPC.

### Библиографический список

1. Медведев, А. М. Технологическое обеспечение надежности межсоединений [Текст] / А. М. Медведев // Технологии в электронной промышленности. – 2005. - № 5. – С. 60-62.
2. Пиганов, М. Н. Прогнозирование надежности радиоэлектронных средств [Текст] / М. Н. Пиганов, С. В. Тюлевин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2009. - №1 (72). – С. 174-180.
3. Пиганов, М. Н. Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов микросборок [Текст] / М. Н. Пиганов. – Самара: СГАУ, 1999. – 160 с.
4. Пиганов, М. Н. Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов и компонентов микросборок [Текст] / М. Н. Пиганов. – М.: Новые технологии, 2002. – 267 с.
5. Тюлевин, С. В. Структурная модель индивидуального прогнозирования параметров космической аппаратуры [Текст] / С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2008. - № 1. – С. 92-96.
6. Тюлевин, С. В. Методика обучающего эксперимента при индивидуальном прогнозировании показателей качества космических РЭС [Текст] / С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: матер. Всеросс. НТК. – Самара: Изд-во СГАУ, 2008. – С. 239-253.
7. Вестерлакен, Э. Характеристики паяльных паст: что нужно знать? [Текст] / Э. Вестерлакен // SMT эксперт. – 2010. - № 5. – С. 22-33.
8. Шумских, И. Ю. Исследование параметров паяльных паст с целью прогнозирования надежности паяных соединений [Текст] / И. Ю. Шумских // Современные направления теоретических и прикладных исследований – 2011: сборн. научн. тр. – Украина, Одесса: Черноморье. – 2011. – Т.6. – С. 58-64.

## TRAINING EXPERIMENT AT FORECASTING OF QUALITY AND RELIABILITY OF SOLDERED JOINTS OF ELECTRONIC ASSEMBLAGES

© 2011 I. Y. Shumskikh<sup>1</sup>, S. V. Tyulevin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

<sup>2</sup>Samara Space Center

The technique of training experiment is resulted at forecasting of reliability and quality of joints of electronic assemblages on the basis of new perspective soldering pastes. Questions of control of informative and predicted parameters are considered. Experimental data on levels of these parameters are received.

*Training experiment, forecasting, quality and reliability, soldered joints, soldering pastes, electronic assemblages, tests.*

### Информация об авторах

**Шумских Илья Юрьевич**, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [il815@yandex.ru](mailto:il815@yandex.ru). Область научных интересов: качество паяных соединений электронных узлов.

**Тюлевин Сергей Викторович**, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, кандидат технических наук, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: надёжность и качество космических радиоэлектронных средств.

**Shumskikh Ilya Yuryevich**, post-graduate student of the department of construction and design radio electronic devices, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [il815@yandex.ru](mailto:il815@yandex.ru). Area of research: reliability and quality of radio electronic devices.

**Tyulevin Sergei Viktorovich**, assistant professor of design and production of radio-electronic means department, Ph.D., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: quality and reliability of space-based radio-electronic means.

## АППРОКСИМАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИНДУКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ФУНКЦИИ ГАУССА С РАЗНОСТНЫМ АРГУМЕНТОМ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

© 2011 В. С. Тиньгаев<sup>1</sup>, С. А. Матюнин<sup>2</sup>, В. А. Медников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

<sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Рассматривается аппроксимация позиционной характеристики первичных преобразователей с помощью модифицированной функции Гаусса. Для уменьшения погрешности находим коэффициенты аппроксимирующей функции отдельно для каждого интересующего участка.

*Математическая модель, аппроксимация, преобразователи линейных перемещений, погрешность, аппроксимирующая функция, коэффициенты аппроксимирующей функции, позиционная характеристика датчика линейных перемещений.*

Преобразователи линейных перемещений (ПЛП) являются одним из важных измерительных элементов высокоточных систем управления и контроля, в том числе в авиационной и ракетно-космической технике. Разработкой и выпуском точных и компактных преобразователей перемещения занимаются достаточно многие фирмы, но только очень немногие из них могут выпускать преобразователи для жестких условий эксплуатации (Heidenhain, Германия; Sony и Mitutoyo, Япония; Harley Precision Instrument, США и некоторые др.). В связи с работами по модернизации и созданию новых типов ракетных, авиационных и наземных боевых комплексов наблюдается рост числа исследований по созданию первичных преобразователей с высокими стабильными метрологическими показателями, в том числе устойчивыми к особо жестким внешним дестабилизирующим факторам: виброударным воздействиям, перепадам температуры.

Для отработки конструкции и ее оптимизации необходима математическая модель, которая достаточно точно описывала бы или которая могла бы аппроксимировать экспериментальные данные по возможности более точно с использованием небольшого количества коэффициентов, характеризующих модель. Анализ характера экспериментально

полученных позиционных характеристик  $U_j$  показал, что функция

$$Y(x) = a + b \cdot (x_0 - x) \cdot e^{-c \cdot (x_0 - x)^2} \quad (1)$$

имеет подобный вид.

Для определения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $x_0$  предложенной зависимости применима функция regress пакета Mathcad.

Оценку погрешности аппроксимации  $W$ , замены набора экспериментально полученных значений отсчетов  $j$  позиционной характеристики аппроксимирующей функцией  $Y(x)$  произведем по формуле

$$W(a, b, c, x_0) = \frac{1}{Nn - 1} \times \sum_{j=0}^{N-1} (U_j - Y(x_j, a, b, c, x_0))^2, \quad (2)$$

где  $N_n$  – количество экспериментальных точек.

Коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $x_0$  можно найти методом наименьших квадратов, минимизируя функцию погрешности  $W$ :

$$W_{\min} = \text{Minimize}(W, a, b, c, x_0). \quad (3)$$

Для всего массива экспериментально полученных данных найдены оптимальные значения коэффициентов:

$$a=0,12; b=2,037 \cdot 10^{-3}; c=0,218; x_0=12,591.$$

На рис. 1 графически представлена аппроксимирующая функция  $Y(x)$  и исходный набор данных  $U_j(x_j)$ .

Так, для всего диапазона аппроксимации экспериментальной характеристики минимальная погрешность была получена из формулы среднеквадратической ошибки:

$$\gamma = \frac{1}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot \sqrt{W(a, b, c, x_0)} = 0,021. \quad (4)$$

Таким образом, ошибка аппроксимации экспериментальной характеристики всего диапазона измерений составляет 2,1 %.

Полученная аппроксимирующая функция достаточно хорошо приближает рабочий (средний) участок характеристики (с погрешностью 1%) и качественно описывает на-

чальный (с погрешностью 4,6%) и конечный участки (с погрешностью 2,7%).

Для уменьшения погрешности можно находить коэффициенты аппроксимирующей функции отдельно для каждого интересующего участка. Так для начального участка

$$W(a, b, c, x_0) = \frac{1}{144 - 1} \times \sum_{j=0}^{144-1} (U_j - Y(x_j, a, b, c, x_0))^2 \quad (5)$$

оптимальными являются коэффициенты:  $a=0,12$ ,  $b=3,345 \cdot 10^{-3}$ ,  $c=0,281$  и  $x_0=-19,351$ .

На рис. 2 представлена функция, аппроксимирующая начальный участок позиционной характеристики.

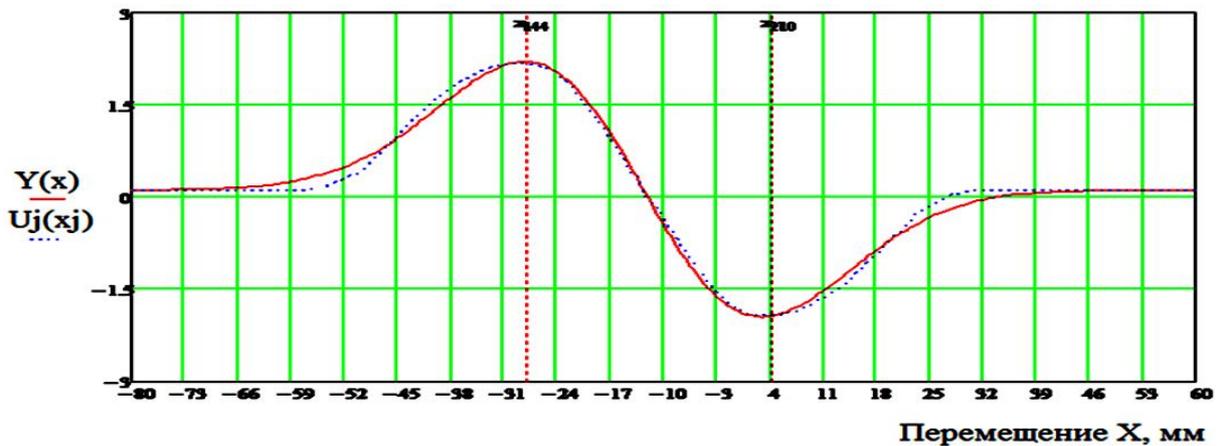


Рис. 1. Позиционные характеристики экспериментальной  $U_j$  и аппроксимирующей  $W(a, b, c, x_0)$  функции при  $a=0,12$ ,  $b=2,037 \cdot 10^{-3}$ ,  $c=0,218$ ,  $x_0=-12,591$

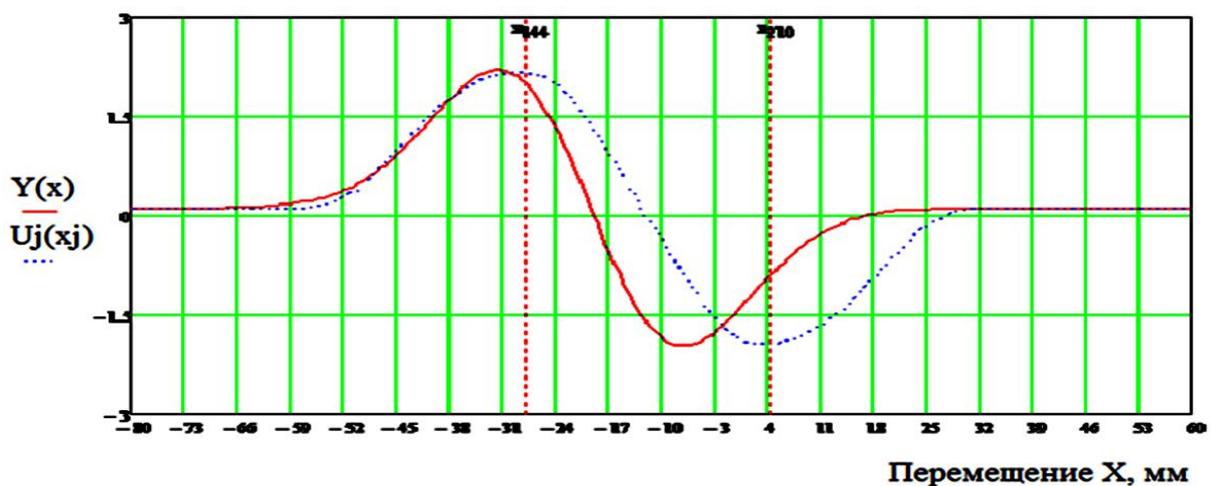


Рис. 2. Позиционные характеристики экспериментальной  $U_j$  и аппроксимирующей  $W(a, b, c, x_0)$  функции при  $a=0,12$ ,  $b=3,345 \cdot 10^{-3}$ ,  $c=0,28$ ,  $x_0=-19,351$ , начальный участок аппроксимации в точках отсчётов  $0 \dots 144$

Погрешность аппроксимации, рассчитанная по формуле

$$\gamma = \frac{1}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot \sqrt{W(a, b, c, x_0)}, \quad (6)$$

уменьшилась с 4,6% до 2,5%.

Для среднего участка позиционной характеристики датчика линейных перемещений (7) оптимальными являются коэффициенты:

$$a=0,12, \quad b=1,665 \cdot 10^{-3}, \quad c=0,2, \quad x_0=-12,517.$$

На рис. 3 представлена функция, аппроксимирующая средний участок позиционной характеристики датчика линейных перемещений:

$$W(a, b, c, x_0) = \frac{1}{210 - 144} \times \sum_{j=144}^{210} (U_j - Y(x_j, a, b, c, x_0))^2. \quad (7)$$

Погрешность аппроксимации для этого случая составляет

$$\gamma = \frac{1}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot \sqrt{W(a, b, c, x_0)} = 0,008. \quad (8)$$

Таким образом, аппроксимируя только средних (как правило, рабочий) участок, погрешность аппроксимации можно уменьшить с 1% до 0,8%.

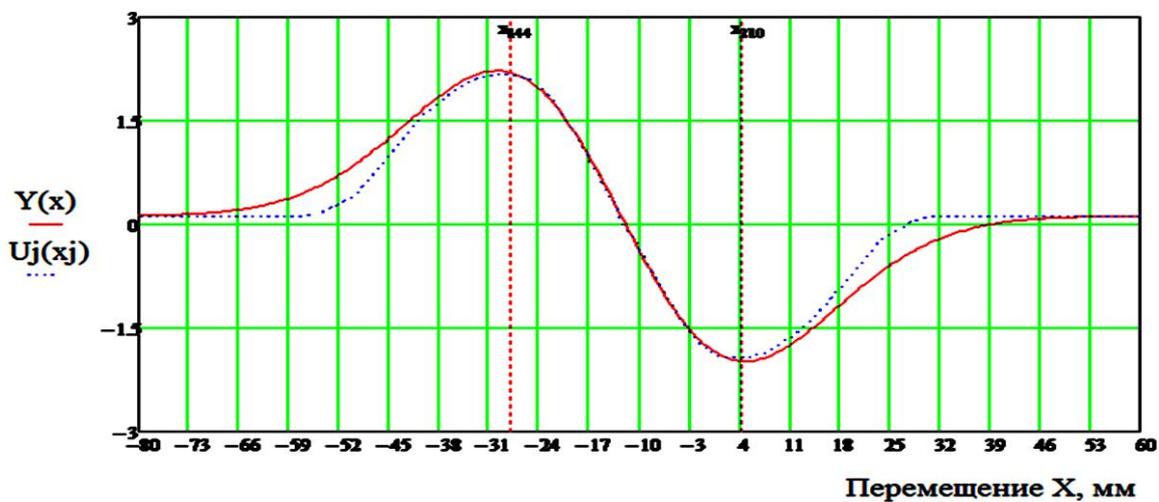


Рис. 3. Позиционные характеристики экспериментальной  $U_j$  и аппроксимирующей  $W(a, b, c, x_0)$  функции при  $a=0,12$ ,  $b=1,665 \cdot 10^{-3}$ ,  $c=0,2$ ,  $x_0=-12,517$ , средний участок аппроксимации в точках 144...210

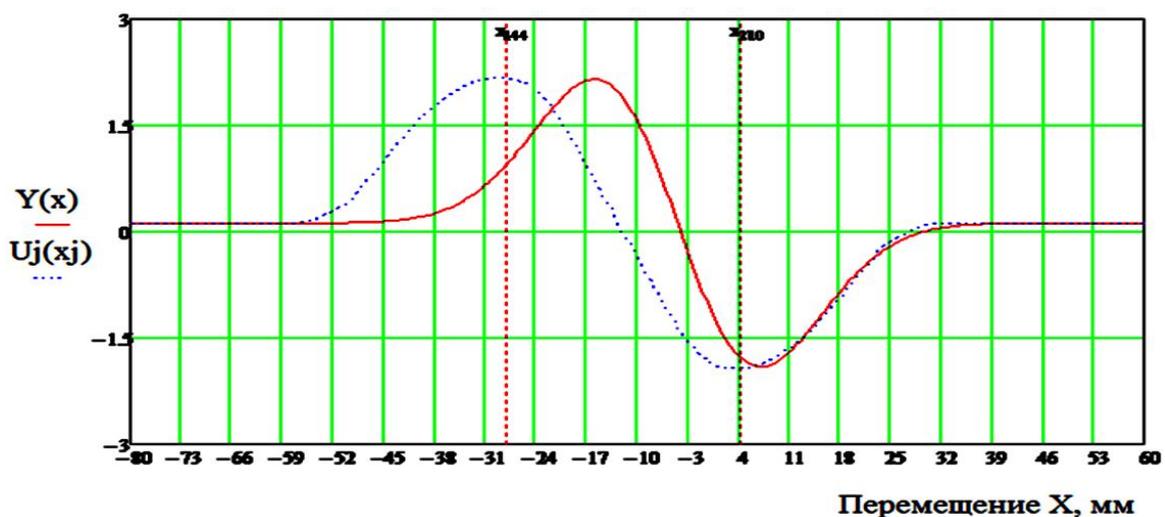


Рис. 4. Позиционные характеристики экспериментальной  $U_j$  и аппроксимирующей  $W(a, b, c, x_0)$  функции при  $a=0,12$ ,  $b=3,792 \cdot 10^{-3}$ ,  $c=0,291$ ,  $x_0=-4,372$ , конечный участок аппроксимации в точках 210...320

Для конечного участка позиционной характеристики датчика линейных перемещений

$$W(a, b, c, x_0) = \frac{1}{Nn - 209} \times \sum_{j=210}^{Nn-1} (U_j - Y(x_j, a, b, c, x_0))^2 \quad (9)$$

оптимальными являются коэффициенты:  $a=0,12$ ,  $b=3,792 \cdot 10^3$ ,  $c=0,291$ ,  $x_0=-4,372$ .

На рис. 4 представлена функция, аппроксимирующая конечный участок позиционной характеристики датчика линейных перемещений. Погрешность аппроксимации, определённая для этого случая:

$$\gamma = \frac{1}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot \sqrt{W(a, b, c, x_0)} = 0,018. \quad (10)$$

При этом погрешность аппроксимации уменьшается с 2,7% до 1,8%.

### Выводы

При разбиении аппроксимации экспериментальной характеристики на три участка значительно уменьшалась ошибка аппроксимации, а именно:

1. На начальном участке ошибка стала 2,5%, была 4,6%.

2. На среднем участке ошибка стала 0,8%, была 1%.

3. На конечном участке ошибка стала 1,8%, была 2,7%.

При раздельном аппроксимировании участков экспериментальной характеристики датчиков линейных перемещений ошибка аппроксимации существенно уменьшается.

### Библиографический список

1. Карпов, В. И. Проектирование датчиков для измерения механических величин [Текст] / В. И. Карпов. – М.: Машиностроение 1979.

2. Аш, Ж. Датчики измерительных систем Кн. 1 [Текст] / Ж. Аш. – М.: Мир 1992.

3. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник [Текст] / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера 2005.

4. Baumer (Швейцария) Индуктивные датчики с пропорциональным (аналоговым) выходом [http:// www.promsystem.ru/catalog](http://www.promsystem.ru/catalog)

5. Baumer (Швейцария) Магнитные датчики, датчики линейных перемещений [http:// www.promsystem.ru/catalog](http://www.promsystem.ru/catalog)

## APPROXIMATION OF CHARACTERISTICS OF LINEAR DISPLACEMENT INDUCTIVE SENSORS USING MODIFIED GAUSSIAN FUNCTION WITH A FIRST ORDER DIFFERENCE ARGUMENT

© 2011 V. S. Tingaev<sup>1</sup>, S. A. Matyunin<sup>2</sup>, V. A. Mednikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FSUE SRPSRC "TsSKB-Progress"

<sup>2</sup>Samara state aerospace university named after S. P. Korolyov  
(National research university)

The paper deals with approximation of positional characteristic of sensor using modified Gaussian function. In order to decrease the error, approximation function coefficients are calculated separately at every interval of interest.

*Computational model, approximation, linear displacement sensors, error, approximation function, approximation function coefficients, positional characteristic of linear displacement sensor.*

### Информация об авторах

**Тингаев Владимир Сергеевич**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), начальник сектора отдела 1507 ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: tingaev

@inbox.ru. Область научных интересов: информационно-измерительные системы и приборы, электромагнитные элементы и устройства вычислительной техники систем управления.

**Матюнин Сергей Александрович**, заведующий кафедрой электронных систем и устройств, д.т.н., профессор, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [mitrea.sgau@rambler.ru](mailto:mitrea.sgau@rambler.ru). Область научных интересов: информационно-измерительные системы и приборы, элементы и устройства вычислительной техники систем управления.

**Медников Валерий Александрович**, доцент кафедры электронных систем и устройств, к.т.н., Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [wamednikov@gmail.com](mailto:wamednikov@gmail.com). Область научных интересов: информационно-измерительные системы и приборы, элементы и устройства вычислительной техники систем управления.

**Tingaev Vladimir Sergeevich**, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University), leader of sector FSUE SRPSRC “TsSKB-Progress”. Scientific interests: information and measurement systems and devices, electromagnetic elements of control systems computers. E-mail: [tingaev@inbox.ru](mailto:tingaev@inbox.ru).

**Matyunin Sergey Alexandrovitch**, head of department of electronic systems and devices, professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [mitrea.sgau@rambler.ru](mailto:mitrea.sgau@rambler.ru). Scientific interests: information and measurement systems and devices, electromagnetic elements of control systems computers.

**Mednikov Valeriy Alexandrovitch**, associate professor of electronic systems and devices, Ph.D., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [wamednikov@gmail.com](mailto:wamednikov@gmail.com). Scientific interests: information and measurement systems and devices, electromagnetic elements of control systems computers.

УДК 535.015

## ИССЛЕДОВАНИЕ АПЕРТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН МАЛОЙ ДЛИНЫ

© 2011 В. Д. Паранин<sup>1</sup>, М. В. Дашков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup> Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

В работе проведено экспериментальное исследование апертурных характеристик отрезков одно- и многомодовых телекоммуникационных оптических волокон на длинах волн 655...690 нм. Отмечено распространение мод низших порядков в волокне Corning SMF-28e и возможность модового уплотнения короткой линии связи. Установлено распространение оптического излучения по оболочке отрезков оптических волокон.

*Оптическое волокно, апертурные характеристики, модовый состав.*

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) нашли широкое применение в информационных системах: телекоммуникационных, вычислительных, промышленных [1,2]. В телекоммуникациях наиболее интенсивно используется инфракрасный диапазон длин волн 820...880, 980, 1260...1675 нм, что связано с минимальным коэффициентом затухания кварцевых оптических волокон в этой области, около 0,2 – 3,0 дБ/км [1-4]. Протяженность ВОЛС составляет от нескольких километров на городских сетях до сотен и тысяч километров на магистральных участках сетей связи. Промышленностью также освоен выпуск одно- и многомодовых волокон для ультрафиолетового и видимого диапазона длин волн [3, 4], однако высокий уровень затухания препятствует применению данного типа волокон в промышленных и телекоммуникационных системах. Наряду с системами на основе протяженных ВОЛС существуют системы, требующие передачи оптической энергии на относительно небольшие расстояния, порядка единиц – десятков метров. В качестве примера можно указать на бортовые информационно-управляющие системы [5], внешние электрооптические дифракционно-интерференционные модуляторы для источников оптического излучения [6, 7], технологические волоконные лазеры [8]. При таких длинах волокон затухание в стандартных волокнах будет составлять не более 0,15...0,20 дБ в видимом и

ближнем инфракрасном диапазонах. Это обстоятельство позволяет расширить возможности спектрального уплотнения канала, реализовать функциональные электрооптические элементы, интегрированные в ВОЛС. Данная работа направлена на экспериментальное исследование апертурных характеристик стандартных волокон инфракрасного диапазона при работе в видимом диапазоне длин волн, в частности, на длинах волны 655...690 нм. Выбор рабочих длин волн обусловлен наличием известных зависимостей электрооптических коэффициентов в этом диапазоне [9, 10], что необходимо для корректного проектирования функциональных электрооптических элементов и устройств.

В эксперименте исследовалось кварцевое одномодовое волокно Corning SMF-28e с диаметром сердцевины 8,2 мкм, номинальным диаметром 125 мкм и кварцевое многомодовое волокно Corning Multimode 50/125 с диаметром сердцевины 50 мкм, номинальным диаметром оболочки 125 мкм. Длина образцов составляла 0,5 м, при проведении исследования волокна находились в свободном (не скрученном) состоянии. Концы волокон очищались от внешнего защитного покрытия на длину 15 мм, после чего производилось скалывание. Скол оптических волокон под углом  $90 \pm 0.5^\circ$  осуществлялся на устройстве Fujikura CT-30A. Качество скола торца контролировалось визуально с помощью микроинтерферометра МИИ-4 при уве-

личении 500х. Волокна, на торцах которых присутствовали значительные, размером десятки микрометров, царапины и выколки, трещины, боковые сколы (рис.1,а,б,в), отбраковывались.

В качестве источника оптического излучения использовался лазерный диод HL6738MG с пиковой длиной волны 690 нм и шириной спектра 1,7...2,0 нм, а также светодиод АЛ336Б, излучающий в диапазоне 655...680 нм. В качестве приёмника излучения использовалась цифровая ПЗС-камера VAI-135, чувствительная в области длин волн 400...1100 нм по уровню 0,1. Излучение вводилось в приёмный торец оптического волокна с помощью плоско-выпуклой линзы с фокусным расстоянием 25 мм. Выходной торец волокна перемещался относительно ПЗС-

матрицы с помощью микрометра МК 50-25 (1 класс) с ценой делений 10 мкм в пределах 0..1000 мкм с шагом 200 мкм. Момент касания выходного торца поверхности ПЗС-матрицы контролировался визуально по изгибу волокна (грубо), а также с помощью изображения на экране (точно). Наличие шумов ПЗС-матрицы устранялось среднеквадратической аппроксимацией.

На рис.2, 3 представлено распределение интенсивности на выходе одномодового волокна для случая освещения лазерным диодом (рис.2,а,б) и светодиодом (рис.3). Кривые с наибольшей интенсивностью характерны для установки выходного торца вплотную к ПЗС-матрице. Расстояние между соседними положениями волокна составляет 200 мкм.

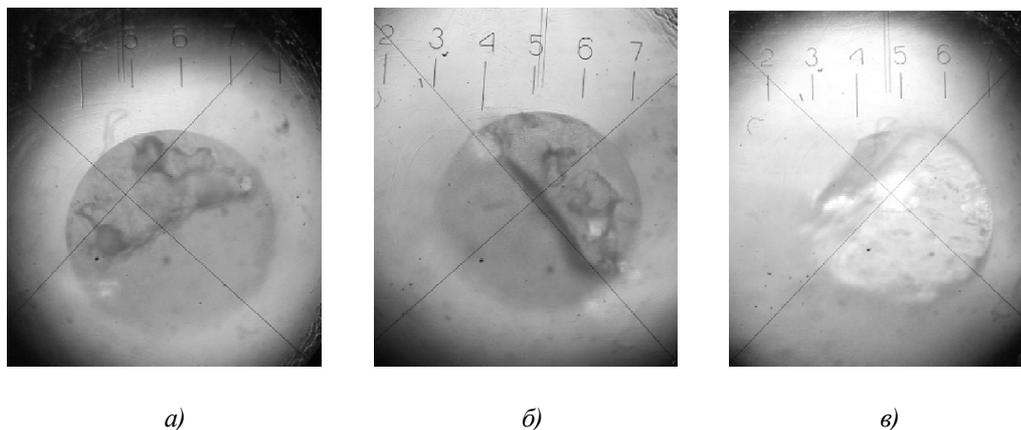


Рис. 1. Примеры торцов отбракованных оптических волокон: а) значительные царапины и сколы на торце; б) трещина на торце; в) боковой скол волокна

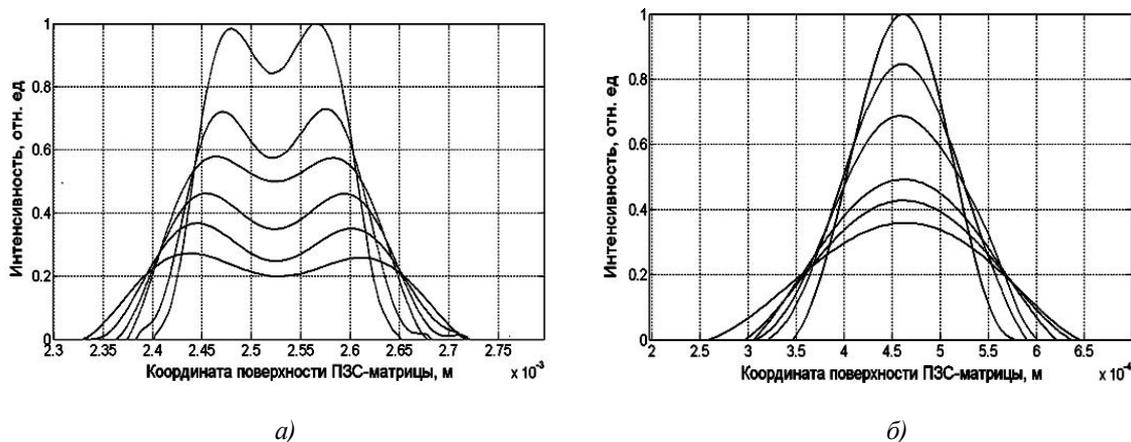


Рис. 2. Распределение интенсивности света на выходе одномодового оптического волокна при освещении лазерным диодом: а) расстояние от линзы до торца 50 мм; б) расстояние от линзы до торца 25 мм

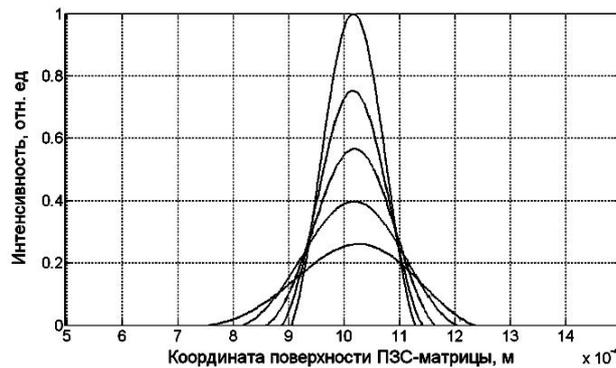


Рис. 3. Распределение интенсивности света на выходе одномодового оптического волокна при освещении светодиодом АЛ336Б (расстояние от линзы до торца 25 мм)

В соответствии с данными рис.2,а в распределении интенсивности на выходе одномодового волокна имеется провал в центральной части, углубляющийся при удалении торца от ПЗС-матрицы. Данный эффект может быть связан с различными углами высвечивания мод оптического волокна, что открывает возможности углового модового уплотнения. Для случая освещения светодиодом (рис.3) распределение интенсивности имеет единственный максимум и может быть описано экспоненциальными функциями Гаусса. Отдельные моды в волокне при использовании светодиодного источника не наблюдались. Это может быть связано с меньшей когерентностью по сравнению с лазерным диодом и большей шириной спектра, обуславливающей перекрытие мод на выходе волокна. Ширина освещенной области по уровню  $1/e$  при установке выходного торца вплотную к ПЗС-матрице составила 175...178 мкм для освещения лазерным дио-

дом и 150...155 для освещения светодиодом. Это означает, что в обоих случаях эффективное распространение оптического излучения происходит не только по сердцевине, но и по оболочке волокна. Выявлено, что при перемещении входного торца ОВ относительно фокусирующей линзы в фокальной плоскости по осям  $x$  и  $y$  в приёмнике излучения, сопряженном с выходным торцом ОВ, формируется многомодовая картина, число мод в которой зависит от параметра перемещения и типа источника излучения.

На рис.4 приведены некоторые распределения интенсивности на выходе волокна, полученные указанным образом. Размеры областей равны 1x1 мм.

Необходимо отметить, что приведенные на рис.4 распределения интенсивности являются известными модами низшего порядка [11]. Так, изображение на рис.4,а соответствует  $HE_{12} + EH_{11}$  моде, рис.4,б —  $HE_{31}$  моде, рис.4,в — их сочетанию.

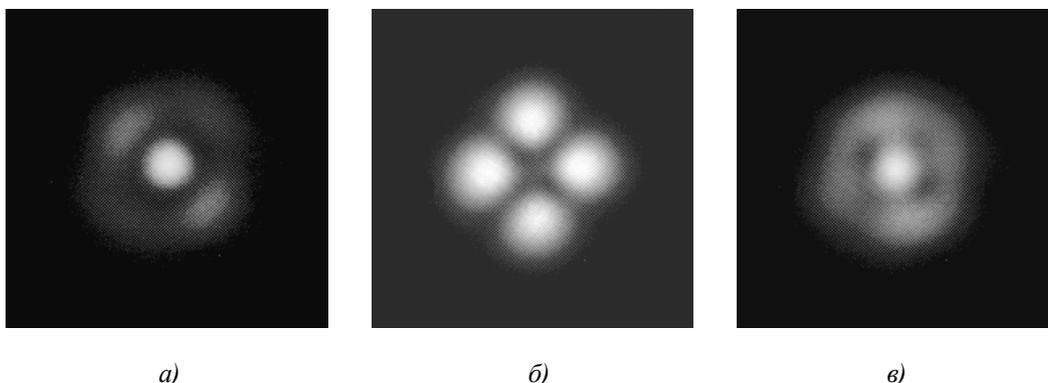


Рис. 4. Распределения интенсивности, полученные перемещением приёмного торца волокна вдоль поверхности лазерного диода

Иных мод на выходе волокна не наблюдалось. Следовательно, волокно SMF 28e, являющееся одномодовым на длине волны 1310 нм, в случае излучателя с длиной волны 690 нм поддерживает распространение нескольких мод низшего порядка.

На рис.5 представлено распределение интенсивности на выходе многомодового волокна для случая освещения лазерным диодом (рис.5,а) и светодиодом (рис.5,б). Расстояние от линзы до торца равнялось 25 мм. Расстояние между соседними положениями волокна составляло 200 мкм.

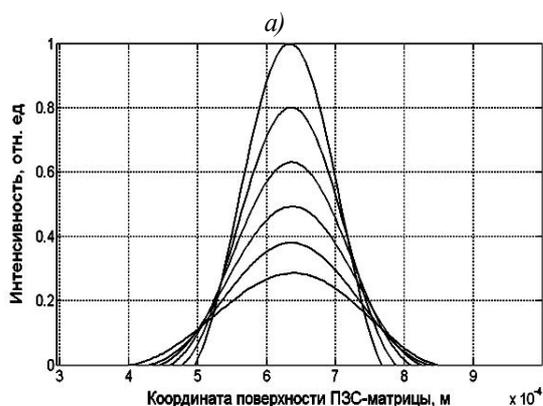
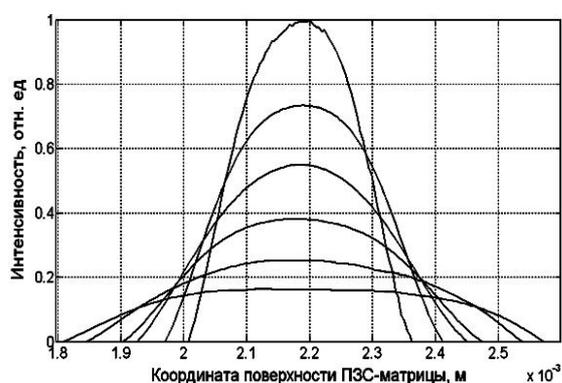


Рис. 5. Распределение интенсивности света на выходе многомодового оптического волокна:  
а) при освещении лазерным диодом;  
б) при освещении светодиодом АЛ336Б

Для многомодового волокна распределение интенсивности в обоих случаях имеет единственный максимум и может быть описано экспоненциальными функциями Гаусса. Ширина освещенной области по уровню  $1/e$  при установке выходного торца вплотную к ПЗС-матрице составила 255...260 мкм при

освещении лазерным диодом и 180...185 мкм при освещении светодиодом. Таким образом, распространение оптического излучения происходит не только по сердцевине, но и по оболочке волокна. В работе проведено экспериментальное исследование апертурных характеристик инфракрасных оптических волокон малой длины в диапазоне длин волн 655...690 нм. Зафиксировано распространение оптического излучения в оболочке одно- и многомодовых волокон, что позволяет увеличить интенсивность передаваемого излучения. Отмечено распространение мод низшего порядка при освещении волокна Corning SMF-28e лазерным диодом 690 нм. Выявлены различные диаграммы направленности мод, что обуславливает возможность углового модового уплотнения.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы», проект № 10в-Б001-053, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

#### Библиографический список

1. Семёнов, А. Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС [Текст] / А. Б. Семенов. - М.: Академия ИТ, 2007.-632 с.
2. Убайдуллаев, Р. Р. Волоконно-оптические сети [Текст] / Р. Р. Убайдуллаев. – М.: Эко Трендз, 2001.-268 с.
3. Каталог оптомеханики и оптики Thorlabs. URL: <http://www.thorlabs.com> (дата обращения: 21.02.2011).
4. Каталог лазеров и оптики Lasercomponents. URL: <http://www.lasercomponents.com> (дата обращения: 21.02.2011).
5. Степанов, М. В. Конструкторско-технологические особенности цифрового МОС-датчика перемещения [Текст] / М. В. Степанов, С. А. Матюнин, В. Д. Паранин // Датчики и системы. – 2009. - №3. – С. 21–24.
6. Матюнин, С. А. Математические моделирование и оптимизация управляемых элементов дифракционной оптики для систем связи [Текст] / С. А. Матюнин, В. Д. Паранин, Ю. А. Федотов // Фотон-Экспресс.- Т.6. - № 78. - 2009. – С. 241-242.

7. Паранин, В. Д. Моделирование оптического коммутатора на основе электрооптического фильтра Фабри-Перо [Текст] / В. Д. Паранин, С. А. Матюнин, А. Р. Мурдагулов // Сборник статей II ежегодной ВНКП «Перспективы развития информационных технологий». - Новосибирск: ЦРНС, 2010. – С. 159-164.

8. Каталог технологических лазеров НТОИРЭ-ПОЮС URL: <http://www.ntoire-polus.ru> (дата обращения: 21.02.2011).

9. Сонин, А. С. Электрооптические кристаллы [Текст] / А. С. Сонин, А. С. Василевская. – М.: Атомиздат, 1971. - 328с.

10. Кузьминов, Ю. С. Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением [Текст] / Ю. С. Кузьминов. – М.: Наука, 1982. - 400 с.

11. Чео, П. К. Волоконная оптика: приборы и системы [Текст] / П. К. Чео. – М.: Энергоиздат, 1988.-280с.

## RESEARCH OF APERTURE CHARACTERISTICS OF SMALL LENGTH OPTICAL FIBERS

© 2011 V. D. Parani<sup>1</sup>, M. V. Dashkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

<sup>2</sup> Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics

In work the experimental research of aperture characteristics of short segments of single- and multimode telecommunication optical fibers on wavelengths of 655-690 nanometers is made. Base mode propagation in a fiber Corning SMF-28e and possibility of mode multiplexing in short communication line is showed. Distribution of optical radiation on a cover of short optical fibers is established.

*Optical fiber, aperture characteristics, mode structure.*

### Информация об авторах

**Паранин Вячеслав Дмитриевич**, аспирант кафедры электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [vparanin@mail.ru](mailto:vparanin@mail.ru). Область научных интересов: управляемые дифракционные и интерференционные оптические элементы, информационно-измерительные системы с волоконно-оптическими линиями связи.

**Дашков Михаил Викторович**, доцент кафедры линии связи и измерения в технике связи, кандидат технических наук, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики. E-mail: [mvd@srffc.ru](mailto:mvd@srffc.ru). Область научных интересов: волоконно-оптические линии передачи, нелинейные и поляризационные явления в оптическом волокне. .

**Paranin Vyacheslav Dmitrievich**, post-graduate student of electronic systems and devices department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University) E-mail: [vparanin@mail.ru](mailto:vparanin@mail.ru). Area of research: tunable diffractive and interference optical elements, information-measuring systems with fiber-optical communication lines.

**Dashkov Michael Viktorovich**, assistant professor of communication lines and measurement in communications technology department, Ph.D., Povolzhskiy State University of telecommunications and informatics. E-mail: [mvd@srffc.ru](mailto:mvd@srffc.ru). Area of research: fiber-optical lines of information transferring, the nonlinear and polarizing phenomena in an optical fiber.

## МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

© 2011 И. Н. Козлова, С. В. Тюлевин, А. В. Токарева

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Приведена методика индивидуального прогнозирования (ИП) полупроводниковых приборов методом экстраполяции. Рассмотрены вопросы выбора квазидетерминированных моделей. Для определения параметров моделей использован метод наименьших квадратов. Получена прогнозная модель надёжности диодов. Приведены результаты исследования и анализа модели. Предложены варианты повышения точности прогнозирования.

*Прогнозирование, диод, качество, дрейф параметров, квазидетерминированная модель, прогнозная модель, экстраполяция, анализ, точность.*

### Введение

Увеличение роли информации в жизни общества, рост потребностей в передаче, накоплении, обработке информации обуславливают широкое использование радиоэлектронных средств (РЭС) во всех областях народного хозяйства, поэтому на РЭС возлагают все более сложные функции, что приводит к ее непрерывному усложнению. Соответственно возрастают требования, предъявляемые к качеству работы РЭС в процессе эксплуатации [1,2].

Одним из перспективных направлений поддержания работоспособного состояния аппаратуры, повышения ее надежности и качества является прогнозирование ее будущего состояния в процессе эксплуатации. При этом наиболее эффективным является индивидуальное прогнозирование (ИП) [3-5].

Для разработки эффективных операторов прогнозирования (прогнозных моделей) требуется знание информативных параметров для оценки конкретных прогнозируемых параметров для каждого электрорадиоизделия (ЭРИ) [6]. Однако для ряда ЭРИ построить модели ИП на основе методов теории распознавания образов невозможно из-за отсутствия достаточно информативных параметров. В этом случае целесообразно использовать методы экстраполяции [7-9].

В данной работе рассмотрены вопросы прогнозирования надежности диодов методами экстраполяции. Разработаны операторы

прогнозирования параметров ряда критичных малоинформативных диодов на основе квазидетерминированных моделей.

### Методика прогнозирования

Построение моделей проводилось по результатам обучающего эксперимента, проведенного по методике [10]. Были использованы выборки, для которых выявить информативные параметры с приемлемым значением коэффициента корреляции не удалось.

Для оценки значения параметра каждого экземпляра выборки на момент времени прогноза  $t_{np}$  на основании совокупности значений параметра  $y^{(j)}(t)$ , измеренных в моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , должен быть построен оператор  $H_y$  следующего вида:

$$y^{*j}(t_{np}) = H_y[y_j(t_1), y_j(t_2), \dots, y_j(t_n)], \quad (1)$$

где  $t_n \ll t_{np}$ .

Таким образом, задача сводилась к выбору квазидетерминированной (КД) модели  $f_{\kappa\delta}$  и определению её коэффициентов  $a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, \dots, a_m^{(j)}$  для каждого экземпляра выборки. В этом случае оценка значения параметра  $y^{*(j)}(t_{np})$  может быть определена следующим образом:

$$y^{*(j)}(t_{np}) = f_{\kappa\delta}[t_{np}, a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, \dots, a_m^{(j)}]. \quad (2)$$

Анализ экспериментальных данных обучающих выборок показал, что флуктуа-

ционная составляющая случайного процесса  $\tilde{y}_{\phi л}(t)$  несущественна по сравнению с монотонной составляющей  $y_{\text{мон}}^{(j)}(t)$  этого процесса. Ограничимся для нашего случая тремя дополнительными аргументами квазидетерминированной функции  $a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)}$ . Тогда моделью случайного процесса будет функция вида

$$f_{\kappa o}(t_{np}, a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)}) = y^{*(j)}(t_{np}). \quad (3)$$

Воспользуемся для определения коэффициентов  $a_o, a_1, a_2$  методом наименьших квадратов. В нашем случае сущность метода сводится к нахождению таких значений  $a_o, a_1, a_2$  выбранной зависимости  $f_{\kappa o}$ , при которых сумма квадратов отклонений значений параметров  $j$ -го экземпляра, вычисленная по КД модели  $y^{*(j)}(t_i)$ , от фактических значений  $y^{(j)}(t_i)$ , будет минимальной, т.е.

$$\sum_{i=1}^k [y^{(j)}(t_i) - f_{\kappa o}(t_i, a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)})]^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Сумма (4) представляет собой функцию трёх переменных (трёх коэффициентов КД модели):

$$U(a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)}) = \sum_{i=1}^k [y^{(j)}(t_i) - f_{\kappa o}(t_i, a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)})]^2. \quad (5)$$

Минимум этой функции достигается при таких  $a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)}$ , при которых её частные производные обращаются в нуль. Для определения  $U_{\min}^{(j)}$  получаем систему из трёх уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U(a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)})}{\partial a_o^{(j)}} &= 0; \\ \frac{\partial U(a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)})}{\partial a_1^{(j)}} &= 0; \\ \frac{\partial U(a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)})}{\partial a_2^{(j)}} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Решение данной системы будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} a_o^{(j)} &= f_o[t_1, t_2, \dots, t_n, y^{(j)}(t_1), y^{(j)}(t_2), \dots, y^{(j)}(t_n)]; \\ a_1^{(j)} &= f_1[t_1, t_2, \dots, t_n, y^{(j)}(t_1), y^{(j)}(t_2), \dots, y^{(j)}(t_n)]; \\ a_2^{(j)} &= f_2[t_1, t_2, \dots, t_n, y^{(j)}(t_1), y^{(j)}(t_2), \dots, y^{(j)}(t_n)]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Таким образом, решением системы (6) являются коэффициенты  $a_o, a_1, a_2$  КД модели. Подставив полученные значения  $a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)}$  в (2), получим оценку значения параметра  $y^{*(j)}$  в момент времени  $t_{np}$ .

Например, для описания временной зависимости дрейфа тока утечки исследуемых выборок диодов была подобрана логарифмическая модель вида

$$y^{*(j)}(t_{np}) = a_o^{(j)} \ln[a_1^{(j)}(t_{np} - t_n) + e], \quad (8)$$

где  $t_n$  – время, соответствующее номеру измерения (соответствует времени старения элемента) в процессе наблюдения за дрейфом.

Особенностью данной модели является то, что функция  $f_{\kappa o}$  в начальный момент времени равна

$$f_{\kappa o}(t_1, a_o^{(j)}, a_1^{(j)}) = a_o^{(j)} \quad (9)$$

и зависит только от двух коэффициентов:  $a_o$  и  $a_1$ . Таким образом, для прогнозирования необходимо будет определить лишь коэффициент  $a_1$ . Так как  $a_o^{(j)} = y^{(j)}(t_o)$ , а для логарифмических моделей  $a_o^{(j)} = y^{(j)}(t_1)$ , то сумма (4) будет представлять собой функцию одной переменной. Обозначим её как  $g(a_1^{(j)})$ . Тогда её можно записать как

$$g(a_1^{(j)}) = \sum_{i=1}^n [y^{(j)}(t_i) - f_{\kappa o}(t_i, y^{(j)}(t_1), a_1^{(j)})]^2, \quad (10)$$

где  $i=1, 2, \dots, n$  – количество измерений. Для логарифмической модели минимум функции будет в следующем случае:

$$\frac{\partial g(a_1^{(j)})}{\partial a_1^{(j)}} = 2 \left[ \sum_{i=1}^k \frac{(a_o^{(j)})^2 (t_i - t_1) \ln [a_1^{(j)}(t_i - t_1) + e]}{a_1^{(j)}(t_i - t_1) + e} - \sum_{i=1}^k \frac{a_o^{(j)}(t_i)(t_i - t_1)}{a_1^{(j)}(t_i - t_1) + e} \right] = 0. \quad (11)$$

Полученная модель вида (8) подвергалась экзамену. Он заключался в определении ошибки прогнозирования по формуле

$$\Delta^{(j)} = \tilde{y}^{(j)}(t_{np}) - y^{*(j)}(t_{np}). \quad (12)$$

Затем оценивали точность прогнозирования (точность оператора ИП) по величине дисперсии ошибки. Она вычислялась по формуле

$$D[\tilde{y}_{np}^{(j)} - y_{np}^{*(j)}] = \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k [\Delta^{(j)} - M(\Delta)]^2, \quad (13)$$

где  $\tilde{y}_{np}^{(j)} = \tilde{y}^{(j)}(t_{np})$ ;  $y_{np}^{*(j)} = y^{*(j)}(t_{np})$ ;  $M(\Delta)$  – среднее значение ошибки (математическое ожидание) для выбранной КД модели. Оно определялось по формуле

$$M(\Delta) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \Delta_k^{(j)}. \quad (14)$$

Если величина дисперсии ошибки  $D[\Delta] = D[\tilde{y}_{np} - y_{np}^*]$  согласуется с установленными требованиями, то полученную модель можно рекомендовать для прогнозирования параметров качества экземпляров других выборок.

В дальнейшем для оценки качества прогнозирования определяли величину второго начального момента  $m_{2(k)}$  по формуле

$$m_{2(k)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta_k^{(j)})^2, \quad (15)$$

где  $\Delta_k^{(j)} = y^{(j)}(t_{np}) - y^{*(j)}(t_{np})$ .

Чем меньше  $m_{2(k)}$ , тем выше точность прогнозирования. Было установлено, что на величину  $m_{2(k)}$  большое влияние оказывает систематическая ошибка. Эта ошибка устранялась введением в модель поправки вида

$$y_1^{*(j)}(t_{np}) = y^{*(j)}(t_{np}) + \Delta_k^{(1)}, \quad (16)$$

где  $\Delta_k^{(1)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta_k^{(j)1}$ .

После нахождения  $y_1^{*(j)}(t_{np})$  определяли  $m_{2(k)}^{(2)}$  и отклонения  $\Delta_k^{(2)}$ . Для моделей (16), которые не устраивали нас по точности, вводили добавку  $\delta$  в следующем виде:

$$y_2^{*(j)}(t_{np}) = a_o^{(j)} \ln \left[ \left( a_1^{(j)} + \delta \frac{a_1^{(j)}}{a_{1\max}} \right) (t_{np} - t_n) + e \right], \quad (17)$$

где  $a_{1\max}$  – максимальное значение коэффициента  $a_1$  для исследуемой выборки;

$$\delta = \frac{1}{n} (A_1^{(j)} - a_1^{(j)}), \quad A_1^{(j)} = a_1^{(j)} \text{ } \forall \delta \text{ } t = t_{i\delta}.$$

Если модель вида (17) не обеспечивала заданной точности, то в неё вводили поправку  $\Delta_k^{(3)}$ :

$$y_3^{*(j)}(t_{np}) = y_2^{*(j)}(t_{np}) + \Delta_k^{(3)}. \quad (18)$$

Для некоторых моделей (18) проводилось улучшение следующим образом:

$$y_4^{*(j)}(t_{np}) = y_2^{*(j)} + \Delta_k^{(3)} \frac{y_2^{*(j)}(t_{np})}{y_{2\max}^*}, \quad (19)$$

где  $y_{2\max}^*$  – максимальное значение из всех  $y_2^{*(j)}(t_{np})$ .

### Прогнозные модели

В результате сравнения полученных вариантов по точности для прогнозирования диодов 2Д503А, 2Д522Б, 2Д237 целесообразно использовать соответственно следующие модели:

$$\left( \frac{\Delta_{ym}}{I_{ym}} \right)^{(j)} = a_o^{(j)} \ln [a_1^{(j)} (1000 - 250) + e] + 0,036;$$

$$\left( \frac{\Delta_{ym}}{I_{ym}} \right)^{(j)} = a_o^{(j)} \ln [a_1^{(j)} (5000 - 250) + e];$$

$$\left( \frac{\Delta_{ym}}{I_{ym}} \right)^{(j)} = a_o^{(j)} \ln \left[ a_1^{(j)} \left( 1 - \frac{0,12}{0,47} \right) (10000 - 500) + e \right] - 0,267 \frac{y_2^{*(j)}}{y_{2\max}^*}.$$

Построенные модели удовлетворяют заданным требованиям по точности прогнозирования.

### Библиографический список

1. Кейджян, Г. А. Прогнозирование надежности микроэлектронной аппаратуры на основе БИС [Текст] / Г. А. Кейджян. – М.: Радио и связь, 1987. – 152с.
2. Пиганов, М. Н. Технологические основы обеспечения качества микросборок [Текст] / М. Н. Пиганов. – Самара: СГАУ, 1999. – 231с.
3. Пиганов, М. Н. Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов и компонентов микросборок [Текст] / М. Н. Пиганов. – М.: Новые технологии, 2002. – 267с.
4. Пиганов, М. Н. Прогнозирование надежности радиоэлектронных средств [Текст] / М. Н. Пиганов, С. В. Тюлевин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2009. - №1 (72). – С. 174-180.
5. Тюлевин, С. В. Структурная модель индивидуального прогнозирования параметров космической аппаратуры [Текст] / С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов // Вестник Самар-

ского государственного аэрокосмического университета. – 2008. - № 1. – С. 92-96.

6. Андреева, В. В. Индивидуальное прогнозирование стабильности прецизионных тонкопленочных конденсаторов на основе алюмината неодима [Текст] / В. В. Андреева, М. Н. Пиганов, В. Н. Роюк, Г. Ю. Скоморохов // Электронная техника. Сер. «Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания». – 1980. – Вып.4. – С. 10-12.

7. Тюлевин, С. В. Выбор методов индивидуального прогнозирования показателей качества РЭС на основе экспертных оценок [Текст] / С. В. Тюлевин, И. Н. Козлова // Современные направления теоретических и прикладных исследований – 2009: Сборн. научн. тр. по матер. междуна. НПК 16-27.03.2009. – Т.4. – Украина, Одесса: Черноморье, 2009. – С. 25-28.

8. Андреева, В. В. Индивидуальное прогнозирование стабильности прецизион-

ных тонкопленочных конденсаторов [Текст] / В. В. Андреева, М. Н. Пиганов, Г. Ю. Скоморохов // Микроминиатюризация радиоэлектронных устройств: Межвуз. сб. – Рязань: РРТИ, 1980. – Вып.3. – С. 72-76.

9. Андреева, В. В. Индивидуальное прогнозирование экстраполяцией стабильности тонкопленочных резисторов [Текст] / В. В. Андреева, М. Н. Пиганов, А. И. Беляков // Микроминиатюризация радиоэлектронных устройств: Межвуз. сб. – Рязань: РРТИ, 1981. – Вып.4. – С. 123-127.

10. Тюлевин, С. В. Методика обучающего эксперимента при индивидуальном прогнозировании показателей качества космических РЭС [Текст] / С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: Материалы всероссийской НТК 13-15 мая 2008. г. Самара. – Самара: Издательство СГАУ, 2008. – С. 239-253.

## FORECASTING TECHNIQUE OF SEMICONDUCTOR DIODES QUALITY INDICATORS

© 2011 I. N. Kozlova, S. V. Tyulevin, A. V. Tokareva

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

Researchers have considered semiconductor devices individual forecasting technique by an extrapolation is resulted. The quasidetermined models choice questions. The method of the least squares is used for models parameters definition. The diodes reliability forecasting model is received. Use results and the model analysis are resulted. Variants of forecasting accuracy increase are offered.

*Forecasting, the diode, quality, parameters drift, the quasidetermined model, forecasting model, extrapolation, the analysis, accuracy.*

### Информация об авторах

**Козлова Ирина Николаевна**, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: деградация полупроводниковых приборов.

**Тюлевин Сергей Викторович**, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, кандидат технических наук, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: надёжность и качество космических радиоэлектронных средств.

**Токарева Алёна Викторовна**, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: надёжность и качество радиоэлектронных средств.

**Kozlova Irina Nikolaevna**, post-graduate student of design and manufacture electronic resources department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: degradation of semiconductor devices.

**Tyulevin Sergei Viktorovich**, assistant professor of design and production radio-electronic means department, Ph.D., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: quality and reliability of space-based radio-electronic means.

**Tokareva Alena Viktorovna**, post-graduate student of design and manufacture electronic resources department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: quality and reliability of radio electronic equipment.

УДК 629.78+621.384.8

## ГАЗОВЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЛИНЕЙНОГО ИОННОГО ЗЕРКАЛА

© 2011 И. В. Пияков, Д. В. Родин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

В статье приведено краткое описание существующих методов фокусировки ионов во времяпролётных масс-спектрометрах, производится сравнение масс-спектрометров с применением ионных зеркал с линейным и нелинейным распределением осевого потенциала. Рассматриваются основные соотношения для расчёта ионно-оптических систем, приводятся результаты моделирования спектрометров двух типов, результаты расчётов зависимости разрешающей способности приборов от массы и начального энергетического разброса ионов. На основе полученных данных даются выводы о преимуществах масс-спектрометров с применением ионного зеркала с нелинейным распределением осевого потенциала.

*Газовый масс-спектрометр, ионное зеркало, масс-рефлектор, фокусировка ионов по энергии второго порядка, компенсация энергетического разброса.*

Времяпролётные масс-спектрометры находят широкое применение не только в земных, но и в космических условиях. Достоинствами времяпролётных масс-спектрометров по сравнению с приборами других принципов действия являются: малые габариты, высокая чувствительность и способность определять состав космических пылевых частиц, имеющих случайный характер взаимодействия с прибором.

Возможности использования времяпролётных масс-спектрометров для решения ряда исследовательских задач, таких как изучение космического пространства, химического состава космической пыли, собственной атмосферы космических аппаратов и т.д., ограничены свойствами ионно-оптических систем пространственного и временного фокусирования ионных пакетов. Традиционные методы временной фокусировки с применением линейных ионных зеркал обеспечивают разрешающую способность приборов ( $R > 500$ ) при дисперсии энергии ионов до 15 % [1-2]. И хотя существуют пути улучшения характеристик масс-рефлектора за счёт оптимального выбора потенциала центральной сетки отражателя [3], тем не менее, фокусирующей системе с однородным полем присущ принципиальный недостаток – рост ошибок компенсации по времени пролета с увеличением энергетического разброса ана-

лизируемых ионных пакетов. Это обстоятельство является существенным фактором, ограничивающим область применения времяпролётных масс-спектрометров с линейным ионным зеркалом, так как для одновременного удовлетворения требованиям по обеспечению высокой разрешающей способности и ограничениям, обусловленным реальной пропускной способностью аппаратуры приёма и обработки масс-спектров, приходится создавать крупногабаритные анализаторы с ускоряющими потенциалами в сотни и тысячи вольт либо ограничивать энергетический спектр ионов, что может быть неприемлемым.

В работе [4] предложен метод расчёта распределения нелинейного осевого потенциала электростатического ионного зеркала, обеспечивающий независимость суммарного времени дрейфа ионов от их начальной энергии. Метод основан на том, что ионам с различной начальной энергией соответствуют свои уникальные эквипотенциалы отражения, продольные координаты которых монотонно возрастают с увеличением энергий соответствующих ионов. Таким образом, ионы с большей энергией проходят больший путь внутри ионного зеркала, что и обеспечивает компенсацию начального энергетического разброса ионов.

Предположим, что распределение потенциала в отражателе вдоль траектории ионов на участках торможения и ускорения описывается монотонной функцией  $\Phi(z)$  с медленно изменяющейся вдоль траектории первой производной  $E(z)$ . Будем полагать также, что ионы движутся вдоль продольной оси симметрии отражателя и траектории торможения и ускорения совпадают. В этом случае время движения ионов в отражателе определяется интегралом

$$t = 2 \sqrt{\frac{m}{2q}} \int_{z_0}^{z^*} \frac{dz}{\sqrt{\Phi(z) + \Delta\Phi}}, \quad (1)$$

где  $\frac{m}{q}$  – отношение массы иона к заряду;  $q\Phi$  – начальная энергия ионов;  $z^*$  – точка касания траектории иона к эвипотенциалу отражателя.

Здесь и далее условно считаем ускоряющий потенциал положительным.

Осуществляя замену переменных, запишем (1) в следующем виде:

$$t = 2 \sqrt{\frac{m}{2q}} \int_{\Delta\Phi}^0 \frac{d\Phi}{E(\Phi)\sqrt{\Delta\Phi}}. \quad (2)$$

Разобьем пределы интегрирования в (2) на  $N$  интервалов и, учитывая, что  $E(z)$  – функция медленно изменяющаяся, получим

$$t = 4 \sqrt{\frac{m}{2q}} \sum_{i=1}^N \frac{\sqrt{\Phi_i} - \sqrt{\Phi_i - h}}{E_i}, \quad (3)$$

где  $E_i$  – некоторое значение функции  $E(z)$  в пределах  $i$ -го интервала интегрирования;  $h$  – шаг интегрирования;  $\Phi_i$  – потенциал в начале  $i$ -го интервала интегрирования.

Потребуем неизменности суммарного времени дрейфа ионов от источника до приёмника для ионов с начальной энергией  $q\Delta\Phi = qih$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ . После ряда преобразований с учётом (3) данное требование сводится к системе уравнений:

$$\begin{cases} T(0) - T(h) = \sqrt{\frac{8m}{qh}} x_1, \\ T(0) - T(2h) = \sqrt{\frac{8m}{qh}} [x_1(\sqrt{2}-1) + x_2], \\ \dots \\ T(0) - T(Nh) = \sqrt{\frac{8m}{qh}} [x_1(\sqrt{N}-\sqrt{N-1}) + x_2(\sqrt{N-1}-\sqrt{N-2}) + \dots + x_N], \end{cases} \quad (4)$$

где  $T(\Delta\Phi)$  – суммарное время пролёта ионов;  $x_i$  – геометрическая ширина участков отражателя, соответствующих интервалам интегрирования.

Решая относительно вектора размеров  $\vec{X}$  систему линейных уравнений (4), получаем распределение осевого потенциала отражателя в виде таблицы

$$\begin{cases} \Phi(K) = Kh, \\ Z(K) = \sum_{i=1}^K x_i. \end{cases} \quad (5)$$

Решение системы (4) не представляет сложности при использовании ЭЦВМ и не требует значительных затрат машинного времени. Это позволяет выбирать шаг решения достаточно малым для того, чтобы приблизить полученное решение к искомому непрерывному.

Данный метод использовался для расчёта распределения потенциала ионного зеркала спектрометра (рис. 1). Эмиттируемый источником ионный пакет с энергией  $q\Delta\Phi$  ускоряется между сетками  $C_1$  и  $C_2$  до энергии  $q(\Delta\Phi + \Phi_0)$ , движется между сетками  $C_2$  и  $C_3$  в бесполовом дрейфовом пространстве, тормозится между сетками  $C_3$  и  $C_4$  до энергии  $q(\Delta\Phi + \Phi_1)$  и отражается в нелинейном ионном зеркале между сетками  $C_4$  и  $C_5$ , далее пролетает между сеткой  $C_4$  и приёмником, где и регистрируется.

Для сравнения полученных результатов был рассчитан спектрометр аналогичной компоновки с применением линейного ионного зеркала по методу, описанному в [1]. Основные соотношения системы следующие:

$$\hat{O}_1 = \frac{2}{3} \cdot \hat{O}_0, \quad \hat{O}_m = \left( \frac{\Delta\hat{O} + \hat{O}_0}{\hat{O}_0} - \frac{2}{3} \right) \cdot \hat{O}_0,$$

$$l_4 = \frac{l_2 + l_5}{4\sqrt{3}} \cdot \frac{\hat{O}_4}{\hat{O}_0},$$

$l_3$  выбирается минимальным, исходя из допустимой прочности конструкции. Расчёт производился для длины бесполового пространства  $l_2$ , равной 20 см, и ускоряющего потенциала  $\hat{O}_0$ , равного 100 В. Результаты расчёта разрешающей способности спектрометров для температур 300 К и 1000 К приведены на рис. 2 и 3. На рис. 4 приведены нор-

мированные зависимости времени пролёта ионов  $\frac{\Delta t}{t_0}$  (здесь  $t_0$  – время пролёта ионов с нулевой начальной энергией  $\Delta \hat{O} = 0$ ) от  $\frac{\Delta \hat{O} + \hat{O}_0}{\hat{O}_0}$  для системы с линейным (линия 1) и нелинейным (линия 2) ионным зеркалом.

Полученные результаты моделирования позволяют сделать вывод о превосходстве масс-спектрометра с применением нелинейного зеркала над традиционным масс-рефлектоном, в отдельных случаях дости-

гающем 2..3 раз. Также следует отметить, что выигрыш в разрешении увеличивается с ростом начального энергетического разброса ионов и позволяет разрешать массы до нескольких тысяч, сохраняя при этом высокую разрешающую способность ( $>100$ ) в диапазоне масс до 150 а.е.м. даже для температур порядка 1000 К, тогда как масс-спектрометр с применением линейного зеркала, при том же температурном разбросе, имеет разрешение  $>100$  только в диапазоне масс до 25 а.е.м.

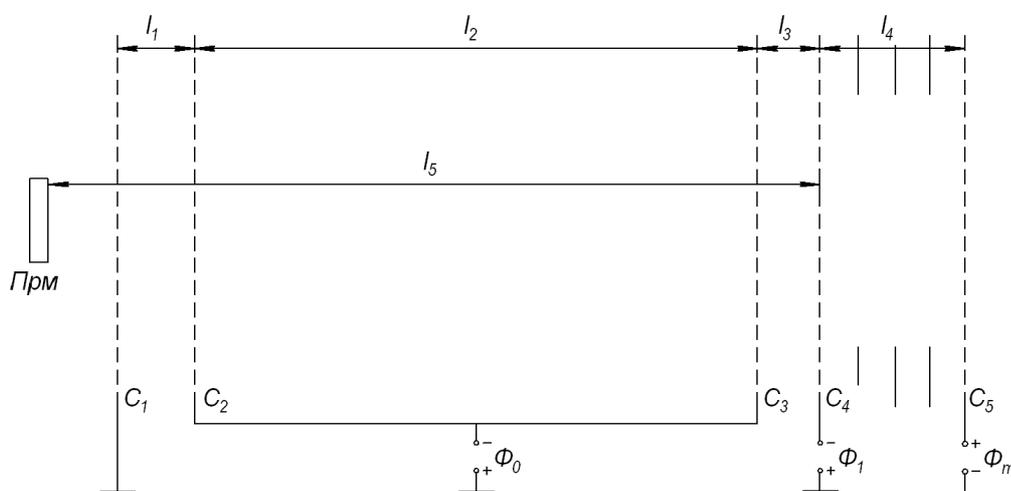


Рис. 1. Схема ионно-оптической системы масс-спектрометра

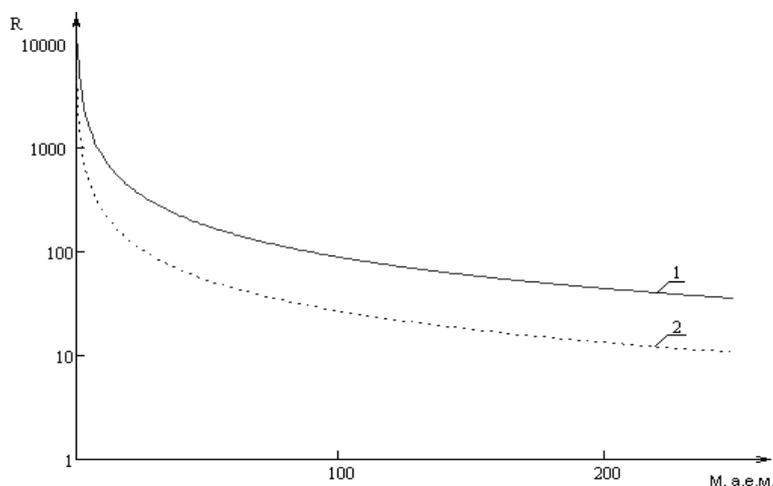


Рис. 2. Зависимость разрешающей способности от массы для схемы с линейным электростатическим зеркалом: 1 – 300К; 2 – 1000К

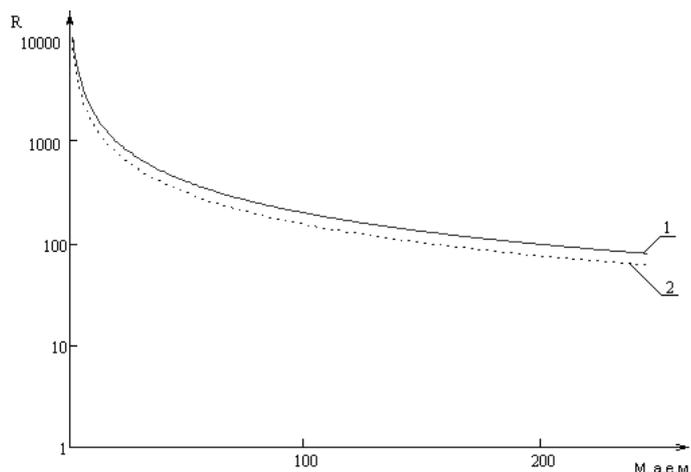


Рис. 3. Зависимость разрешающей способности от массы для схемы с нелинейным электростатическим зеркалом: 1 – 300; 2 – 1000К

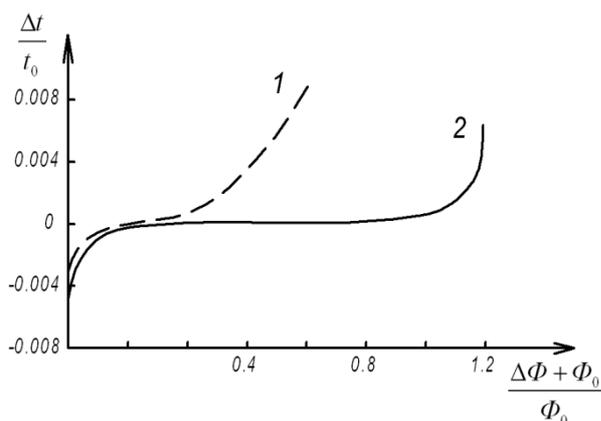


Рис. 4. Нормированные зависимости времени пролёта от начального энергетического разброса

### Библиографический список

1. Картаев, В. И. Новый принцип фокусировки ионных пакетов во времяпролётных масс-спектрометрах [Текст] / В. И. Картаев, Б. А. Мамырин, Д. В. Шмикк // ЖТФ. – 1971. – Т.41. – Вып.7. – С. 1498 – 1501.

2. Картаев, В. И. Новый безмагнитный времяпролётный масс-спектрометр с высокой разрешающей способностью [Текст] / В. И. Картаев, Б. А. Мамырин, Д. В. Шмикк, В. А.

Загулин // ЖТФ. – 1973. – Т.64. – Вып. 1. – С. 82 – 89.

3. Шмикк, Д. В., Отражатель масс-рефлектрона [Текст] / Д. В. Шмикк, Б. Н. Дубенский // ЖТФ. – 1984. – Т.58. – Вып.1. – С. 912 – 916.

4. Глащенко, В. П. Расширение энергетического диапазона фокусируемых ионов во времяпролётном масс-спектрометре [Текст] / В. П. Глащенко, Н. Д. Сёмкин //ЖТФ. – 1985. – Т55. – Вып.5. – С. 904 – 907.

**GAS MASS SPECTROMETER WITH A NON-LINEAR ION MIRROR**

© 2011 I. V. Pijakov, D. V. Rodin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

This article provides a brief description of existing TOF ion focusing methods in mass spectrometers, we compare the mass spectrometer using ion mirrors with linear and nonlinear distribution of axial potential. Researchers have considered the basic equations for the calculation of the ion-optical systems, the results of simulations of two types of spectrometers, the results of calculations depending on the resolution of the instruments of mass and initial energy spread of ions. We derive the advantages of mass spectrometers with nonlinear distribution of axial potential ion mirrors based on these obtained data.

*Gas mass spectrometer, ion mirror, mass reflectron, second-order energy focusing, compensation of the energy spread.*

**Информация об авторах**

**Пияков Игорь Владимирович**, докторант, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, к.т.н., Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [pijakov@mail.ru](mailto:pijakov@mail.ru). Область научных интересов: масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

**Родин Дмитрий Владимирович**, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, инженер института космического приборостроения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [rodin.ssau@mail.ru](mailto:rodin.ssau@mail.ru). Область научных интересов: масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

**Piyakov Igor Vladimirovich**, assistant professor of design and production radio-electronic means department, Ph.D., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [pijakov@mail.ru](mailto:pijakov@mail.ru). Area of research: mass spectrometry, space devices development.

**Rodin Dmitry Vladimirovich**, post-graduate student faculty of radio engineering and medical diagnostic systems, the engineer of the institute of space device engineering, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [rodin.ssau@mail.ru](mailto:rodin.ssau@mail.ru). Area of research: mass spectrometry, space devices development.

## ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОВОДИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

© 2011 А. М. Телегин, М. П. Калаев, Н. Д. Сёмкин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Приведен обзор исследований проводимости диэлектриков и полупроводников при высоких давлениях. Перечислены методы исследования. Представлены экспериментальные данные и теоретические модели.

*Проводимость, высокое давление, высокоскоростное соударение, ускоритель.*

### Введение

В твердых телах под высоким давлением, создаваемым высокоскоростным ударом, имеет место множество самых разнообразных явлений: вспышки, ионизации при высокоскоростном соударении, химические превращения в твердых телах, изменение проводимости и запрещенной зоны ударносжатых полупроводников и диэлектриков [1, 2].

По изменению проводимости можно, в частности, судить о физико-химических процессах, протекающих в сжатых материалах. Знание зависимости изменения проводимости от давления для различных материалов позволяет создавать датчики давления, контролировать процесс обработки материалов в экстремальных условиях.

Параметры состояния конденсированного вещества за фронтом ударной волны могут быть рассчитаны при совместном решении уравнений сохранения массы, количества движения и энергии. Поскольку ударная адиабата вещества, как правило, известна или может быть построена с достаточной точностью, достоверность рассчитанных параметров состояния определяется правильностью выбора уравнения состояния конденсированного вещества при высоких давлениях и температурах [3].

При этом нужно отметить, что процессы, происходящие при высоких давлениях в органических и неорганических диэлектриках, различаются. Это происходит благодаря разнообразию форм химической связи и активности электронов в органических материалах. При этом оказываются возможными

такие изменения проводимости, которые являются недостижимыми для неорганических диэлектриков [4].

Для создания и измерения высокого давления используются различные методы, представленные в работах [5-13].

Условно можно разделить эти методы на экспериментальные и численные. Экспериментальные методы, в свою очередь, проводят на специальном дорогостоящем оборудовании: ускорителях частиц, мощных лазерах, в космическом пространстве. Численные методы основываются на экспериментальных данных.

Наиболее адекватным, по нашему мнению, для моделирования высокоскоростного соударения твердых тел является использование ускорителей частиц, так как они позволяют создать высокие динамические давления.

В настоящее время наиболее эффективным средством решения прикладных задач взаимодействия деформируемых тел и сред являются специальные методы вычислительной математики — численные методы механики сплошных сред. В сочетании с методами программирования и огромными вычислительными возможностями современных компьютеров численные методы механики сплошных сред позволяют создавать расчётные методики (компьютерные коды), являющиеся мощным инструментом в руках инженера-исследователя. Широко распространена программа для расчёта поведения конденсированных тел при ударном нагружении LSDYNA [14]. Также существует оп-

line программа по изучению теплофизических свойств веществ при высоких плотностях энергии <http://teos.ficp.ac.ru/rusbank/> [15].

Но для каждой узкоспециализированной задачи необходимо разрабатывать свою программу либо комбинировать несколько программ. Примером могут служить задачи по изучению ионизации, вспышке, химического состава веществ при высокоскоростном соударении твердых тел, изменения электропроводности материалов [13, 16, 17].

### Модель проводимости

Проведенные исследования [18] показали, что электропроводность органического стекла и парафина в ударной волне изменяется на 15...20 порядков, что свидетельствует о “металлизации” этих диэлектриков при сжатии до давления порядка миллионов атмосфер.

Это явление нельзя объяснить термической ионизацией. Оно связано с изменением структуры электронных зон твердого тела при сжатии. При сжатии зоны сближаются, расстояние между ними уменьшается и, тем самым облегчаются электронные переходы, приводящие к появлению свободных электронов и металлической проводимости в веществе, ранее бывшем диэлектриком.

Опыты с хлористым натрием, который при нормальных условиях обладает небольшой ионной проводимостью, позволяют считать, что основную роль в повышении электропроводности при увеличении амплитуды ударных волн играет температура:

$$\sigma(T) \sim e^{-E/kT},$$

где  $E = 1,2$  эВ – энергия активации [18].

Более общая формула для проводимости, основанная на ионизации вещества и сжатии при давлении, приведена в работе для металлизации водорода [19]:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-\Delta(\rho)/2kT),$$

где  $\Delta(\rho) = 1,22 - 62,6 \cdot (\rho - 0,30)$ ,  $\Delta$  - выражается в эВ,  $\rho$  - в моль·см<sup>-3</sup>, а проводимость  $\sigma_0 = 90$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-3</sup> считается постоянной. Металлизация водорода ( $\Delta = 0$ ) происходит при давлении  $p = 140$  ГПа и температуре  $T=2600$ К. При больших давлениях проводи-

мость практически перестает зависеть от давления.

Другой причиной изменения электропроводности являются фазовые превращения, которые приводят к необратимому изменению электропроводности.

Анализ совокупности экспериментальных данных свидетельствует, что с увеличением давления во фронте ударной волны полиметилметакрилат (PMMA) претерпевает ряд физико-химических превращений, в результате которых свойства более плотных состояний заметно отличаются от наблюдаемых при нормальных условиях. На ударной адиабате превращение начинается в области давления  $P = 214$  кбар и сопровождается резким ростом ударно-индуцированной поляризации нагружаемого образца и потерей оптической прозрачности пластика [20].

Также отмечается, что в ударных волнах может происходить деструкция углеводородов. Деструкция углеводородов за фронтом ударных волн наблюдается при достижении в исходном соединении некоторой температуры  $T^*$ , величина которой определяется кратностью связи между атомами углеводорода в молекуле [21, 22].

Практическим примером применения исследований в области динамического изменения проводимости диэлектриков и полупроводников является построение датчиков космического мусора.

Для определения параметров микрометеороидов и частиц космического мусора необходимы датчики, преобразующие ударные воздействия в электрические сигналы. В качестве детектора в таких датчиках можно использовать пленочные структуры металл – диэлектрик – металл (МДМ) [13, 17, 23, 24].

Моделирование высокоскоростного соударения твердых частиц с чувствительной поверхностью датчика проводится с целью отработки конструктивных элементов датчика, проверки электрических схем регистрации, создания методик обработки результатов, проверки правильности предложенных моделей высокоскоростного взаимодействия пылевой частицы с тонкопленочными структурами.

При толщине верхней обкладки МДМ-структуры больше размера частицы кратер при ударе механически не разрушает материал диэлектрика, но ударная волна за счет сжатия и последующего нагрева приводит к кратковременному увеличению его проводимости. При этом предварительно заряженный конденсатор частично разряжается через канал проводимости. Измеряя остаточное напряжение на конденсаторе, можно оценить интенсивность ударной волны и, следовательно, параметры частицы.

Для оценки изменения проводимости МДМ – структуры необходимо знать характер распространения ударных волн, распространяющихся в конденсаторной структуре после удара. Для этого используют приближенные аналитические зависимости [25], либо численными методами решается система гидродинамических уравнений [18].

Закон изменения электропроводности ударносжатой МДМ-структуры берётся в виде [25]:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-\Delta E / 2 \cdot kT(t)),$$

где  $\sigma_0$  - удельная проводимость диэлектрика при нормальных условиях (температура 20°C,

давление 1 бар), а  $\Delta E$  - текущая ширина запрессованной зоны для полиметилметакрилата.

На основе решения системы гидродинамики и электродинамики с учётом уравнений состояния вещества верхней обкладки и диэлектрика МДМ – структуры приведем зависимости сопротивления ударно – сжатого диэлектрика от времени при различных энергиях частицы (рис.1).

Сопротивление диэлектрика в переходном состоянии под динамическим давлением можно вычислить по формуле [17]:

$$R_{ид}(t) = 0,186 \frac{\rho_y \cdot b \cdot \rho_{01}^{0,4} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{\lambda_{10} \cdot \rho_{02}}{\lambda_0 \cdot \rho_{01}}}\right)^{0,8}}{E^{0,4} \cdot t^{0,8} \cdot \left(\frac{1 - \lambda^2}{\lambda^2}\right)},$$

где  $\rho_y$  – удельное сопротивление материала нижней обкладки,  $b$  – толщина диэлектрика,

$\lambda = 1 - \frac{\rho_{02}}{\rho_2}$ ,  $\lambda_1 = 1 - \frac{\rho_{01}}{\rho_1}$ , при давлении  $p_0$

величины  $\lambda$  и  $\lambda_1$  принимают значения  $\lambda_0$  и  $\lambda_{01}$ ;  $\rho_{02}$ ,  $\rho_{01}$  – собственно исходная плотность среды и ударника.

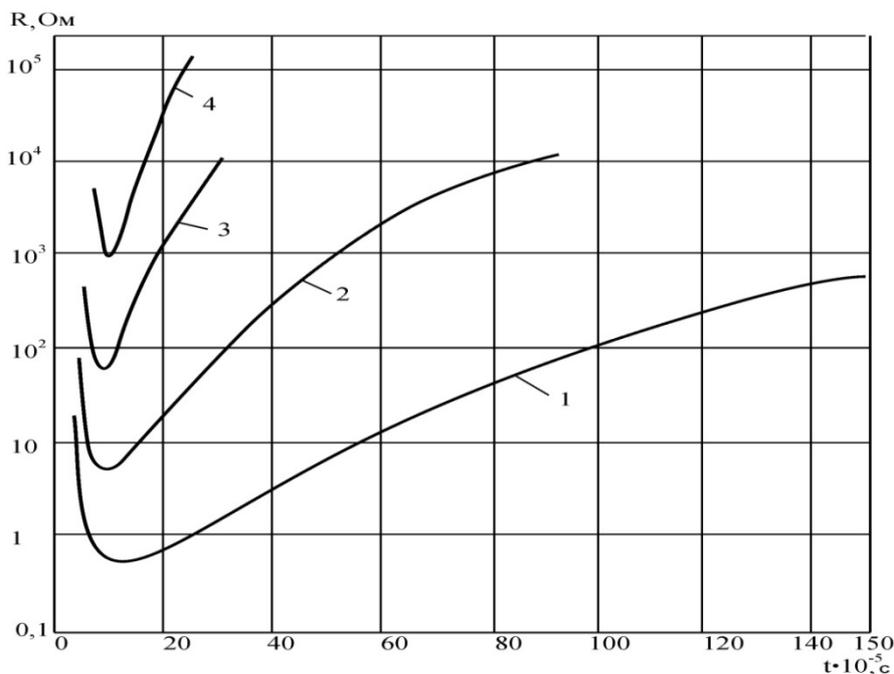


Рис. 1. Зависимость сопротивления ударно-сжатого диэлектрика от времени при различных энергиях удара: 1 -  $E = 1,25 \cdot 10^{-3}$  Дж; 2 -  $E = 10^{-4}$  Дж; 3 -  $E = 10^{-5}$  Дж; 4 -  $E = 10^{-6}$  Дж

### Экспериментальные данные о проводимости ударносжатых материалов

В работе [26] проводилось измерение электропроводности серы при сверхвысоких динамических давлениях электроконтактным методом по четырехточечной схеме. Ударные волны получали с помощью ударника, разогнанного на ускорителе взрывного типа.

Согласно экспериментам авторами было найдено, что сера переходит в металлическое состояние при 200...240 кбар (рис. 2).

Нельзя не отметить также работу [27] по ударному сжатию полупроводника селена (рис.3).

С целью исследования фазовых переходов в селене поставлены разрешенные во времени измерения электропроводности при ударном сжатии до 320 кбар. Найдена зависимость электропроводности от давления, которая включает два участка: резкий рост ( $P < 210$  кбар) и „плато“ ( $P > 210$  кбар). Полученные экспериментальные данные вместе с оценками температуры показывают, что при  $P < 210$  кбар селен находится в полупроводниковом состоянии. В полупроводниковом селене ширина энергетической щели существенно уменьшается при сжатии. При давлении  $P > 210$  кбар электропроводность демонстрирует насыщение на уровне  $\sim 10^4 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ . Столь высокая электропроводность свидетельствует об эффективной металлизации

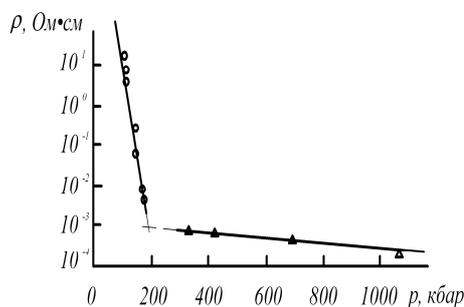


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления серы от давления

ударно-сжатого селена. Эксперименты с образцами различной начальной плотности выявляют влияние температуры на фазовый переход.

Технология измерений при переходе системы диэлектрик (полупроводник)–металл в ударных волнах зависит от величины электропроводности исследуемого вещества [28, 29]. Для относительно невысокой электропроводности ( $\sigma < 10^3 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ ) применимо электротехническое приближение. В этом случае средняя электропроводность вещества  $\sigma$  может быть найдена по формуле [30]:

$$\sigma = \frac{\delta_s}{\rho_s(D-u)t} \left( \frac{V_0}{V} - 1 \right),$$

где  $\delta_s$  — толщина фольги,  $\rho_s$  — удельное сопротивление фольги,  $V_0$  — начальное напряжение,  $D$  — волновая скорость,  $u$  — массовая скорость.

Погрешность измерения электропроводности существенно зависит от величины последней и достигает в настоящей работе до 20%.

При малых ударных давлениях электропроводность селена невелика. В этом случае использовалась модифицированная измерительная ячейка. В образце параллельно направлению распространения ударного фронта располагались плоские контакты из медной фольги (толщина 50 мкм, ширина 10 мм, расстояние 20...30 мм).

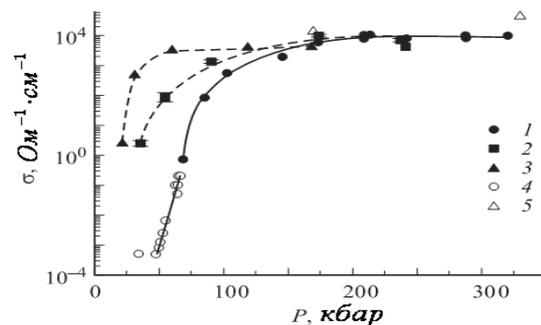


Рис. 3. Зависимость электропроводности селена от давления ударной волны: 1 — сплошной селен; 2 — порошковый селен (плотность 3,1 г/см<sup>3</sup>); 3 — порошковый селен (плотность 1,7 г/см<sup>3</sup>); 4 — данные ударно-волновых экспериментов [31]; 5 — результаты опытов при статическом сжатии [32]

Шунтом служило сопротивление 1...20 Ом, которое располагалось вне зоны действия ударной волны.

Авторы отмечают, что металлический переход происходит за время, которое на девять порядков меньше, чем при статическом сжатии (найденное из осциллограмм время „включения“ проводимости составляет < 10 нс). При этом полный рост электропроводности образца во время сжатия составляет более двенадцати порядков величины.

При разгрузке электросопротивление селена изменяется относительно слабо, что указывает на временное сохранение металлической фазы и задержку обратного перехода. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о гистерезисе проводимости ударно-сжатого селена и существенной асимметрии прямого и обратного переходов.

Полученные данные говорят о протекании в селене фазового перехода, сопровождающегося металлизацией. При давлении  $P < 210$  кбар сплошной селен является полупроводником, при  $P > 210$  кбар — металлом. Давление металлического перехода при ударном сжатии отличается от условий статического сжатия. Металлизация сплошного селена при ударном сжатии обусловлена плавлением или твердофазным переходом. Более ранняя металлизация порошка обусловлена тепловым механизмом.

Представленные в настоящей работе результаты экспериментального исследования селена имеют очевидную качественную общность с поведением другого элементарного полупроводника — кремния [30], что позволяет рассматривать полученные данные как типичные для ударной металлизации полупроводников.

В работе [32] исследовалось электрическое сопротивление политетрафторэтилена (PTFE) при ударном сжатии.

Сопротивление после ударного сжатия политетрафторэтилена определяется в диапазоне давлений от 350 до 630 кбар. Измерения проводились с использованием ячейки толщиной 0,2 мм с равномерным распределением сопротивления по толщине. При давлении выше 350 кбар сопротивление монотонно уменьшается, достигая равновесного значе-

ния за характерное время около 0,5 мкс на расстоянии нескольких миллиметров от плоскости распада разрыва. Результаты показывают на разрушение полимера в диапазоне давлений от 35 до 63 ГПа. Во всем диапазоне давлений среднее значение эмпирической энергии диссоциации составляет  $3,3 \pm 0,7$  эВ, что совпадает в пределах ошибки с энергией связи C-C, равной 3,6 эВ.

Полученные результаты указывают на ионный механизм проводимости при ударном давлении выше 350 кбар. В рассматриваемом диапазоне давлений средняя эмпирическая энергия диссоциации  $E_{duc} = 3,3 \pm 0,7$  эВ, что совпадает в пределах ошибки с энергией одной связи C-C:  $E = 3,6$  эВ.

В работе [33] была измерена удельная электропроводность  $\sigma$  кристаллов фуллере-на  $C_{60}$  в условиях квазиизэнтропического нагружения размытой ударной волной до давления 200 кбар при начальных температурах  $T = 293$  К и 77К. В результате зарегистрировано резкое увеличение  $\sigma$  на 7...8 порядков с  $10^{-6} \dots 10^{-7}$  Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$  при нормальных условиях до 5 Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$  в диапазоне давлений 100...200 кбар. Электропроводность образцов под давлением падает с понижением температуры, что характерно для полупроводников. При снятии давления значение  $\sigma$  возвращается к исходной величине.

На рис.4 представлена зависимость давления (кривая 1) и электропроводности (кривая 2) образца  $C_{60}$  от времени при сжатии размытой ударной волной.

Полученные результаты позволяют говорить о резком уменьшении запрещенной зоны кристаллов  $C_{60}$  при приложении давления. Однако наблюдающаяся зависимость электропроводности под нагрузкой от температуры свидетельствует о том, что ширина запрещенной зоны уменьшается не до нуля и образец при 200 кбар остается полупроводниковым. Это качественно согласуется с данными по воздействию статического давления на кристаллический  $C_{60}$ .

По мнению авторов, в условиях динамических нагрузок характерные пространственный и временной масштабы приводят к практическому отсутствию диффузионного и

химического взаимодействий исследуемых образцов и среды, что исключает возможность объяснения полученных результатов такого вида эффектами.

Анализ многочисленных данных по изменению спектров оптического поглощения кристаллов  $C_{60}$  при приложении гидростатического давления показывает, что ширина запрещенной зоны падает с увеличением давления с коэффициентом  $\beta = dE_G/dP$  порядка 7...10 мэВ/кбар. Полагая, что в используемых чистых кристаллах уровень Ферми находится примерно в середине запрещенной зоны, можно оценить зависимость электропроводности  $\sigma$  от давления при постоянной температуре  $T$ :

$$\sigma / \sigma_0 = \exp(-\beta \cdot t \cdot k^{-1} \cdot T^{-1}),$$

где  $\sigma_0$  - электропроводность при нулевом давлении.

Видно, что при  $P < 11$  ГПа экспериментальные данные хорошо описываются формулой (1), причем величина  $\beta$  порядка 8,4 мэВ/кбар. При большем давлении величина  $\beta$ , формально вычисленная как  $\beta = -2kTd(\log(\sigma / \sigma_0)) / dP$  из наклона зависимости, показанной на рис.5, заметно падает, что до некоторой степени может быть следствием уменьшения сжимаемости (увели-

чения модуля Юнга) кристалла в силу сильной непараболичности потенциала взаимодействия между молекулами  $C_{60}$ .

Экспериментальные исследования взаимодействия ускоренных пылевых частиц с активной МДМ-структурой проводились на основе электродинамического ускорителя [11].

Моделирование проводилось с использованием круглых конденсаторных датчиков (диаметр с  $D_\delta=80$  мм,  $C_\delta=88$  нФ, с толщиной диэлектрика  $h=2$  мкм, напыленными  $Al$  обкладками толщиной 0,035 мкм).

После экспериментов поверхность пленки подвергалась визуальному контролю с помощью микроскопа типа МИИ-4. В результате анализа в пределах возможного увеличения ( $\approx 500$ ) обнаружено наличие двух типов сквозных отверстий в конденсаторных датчиках. Отверстия первого типа представляют собой достаточно ровные сферические отверстия с оплавленными краями диаметром  $d \approx 3...8$  мкм, без видимого повреждения обкладок в окрестности отверстия (рис.6).

Отверстия второго типа являются часто не сферическими, с частично оплавленными краями, диаметром  $d \approx 10...20$  мкм, с характерным рваным отслоением обкладок в окрестности отверстий (рис.7).

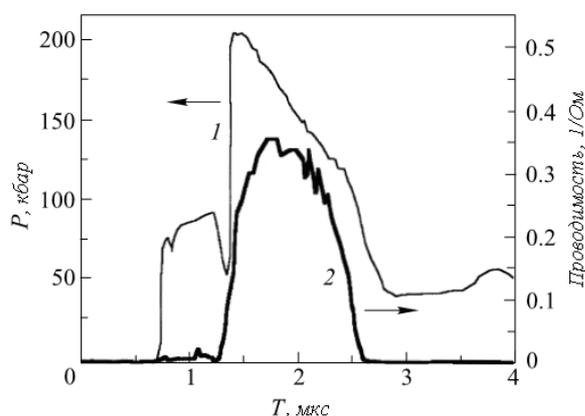


Рис. 4. Зависимость давления (кривая 1) и электропроводности (кривая 2) образца  $C_{60}$  от времени при сжатии размытой ударной волной

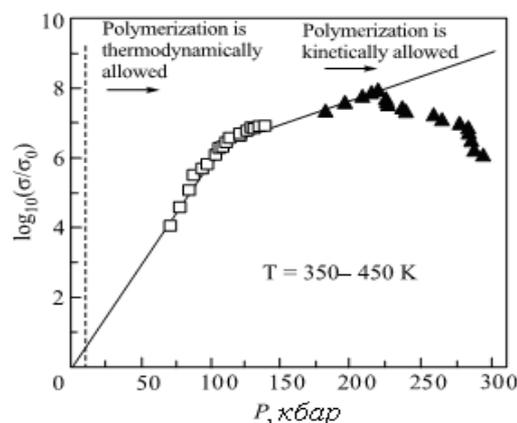


Рис. 5. Зависимость проводимости  $\sigma$  от давления  $P$  для кристаллов  $C_{60}$  при импульсном нагружении. Светлые квадраты - данные из работы [34], темные треугольники - данные работы [35]

Достаточно часто в центре отверстия второго типа наблюдается застрявшая частица размером  $\approx 10$  мкм. Непробиваемых кратеров обнаружить не удалось вследствие низкого усиления микроскопа.

По результатам анализа можно предположить наличие двух механизмов закорачивания обкладок конденсаторного датчика:

- за счёт создания проводимости, стимулирующей электрический пробой конденсатора при соударении высокоскоростной частицы небольшой массы (отверстия первого типа);

- за счёт механического закорачивания обкладок конденсаторного датчика проводящей частицей с размерами  $r_x > h$  или в результате увеличения проводимости (плотности

тока) больше критического значения, соответствующего началу электрического пробоя, при взаимодействии с конденсаторным датчиком низкоскоростной частицы большой массы (отверстия второго типа).

В результате обработки экспериментальных данных получено максимальное значение проводимости конденсаторного датчика при электрическом пробое от скорости и массы пылевой частицы. Они представлены на рис.7

Как можно видеть из рис.8, увеличение электрического поля, прикладываемого к МДМ-структуре, приводит к более сильному изменению проводимости диэлектрика, а следовательно, повышается чувствительность датчиковой аппаратуры.

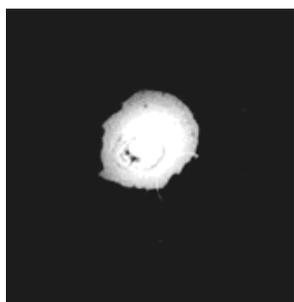


Рис. 6. Фотография отверстия в конденсаторном датчике, случай высокоскоростного соударения

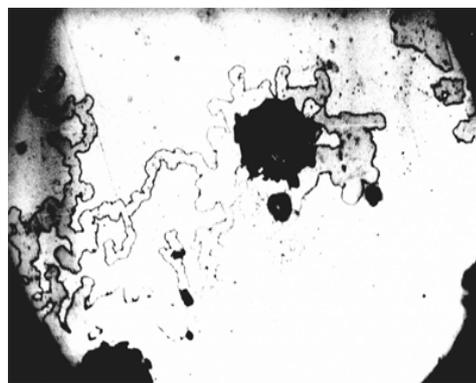


Рис. 7. Фотография отверстия в конденсаторном датчике, случай низкоскоростного соударения (в центре застрявшая частица)

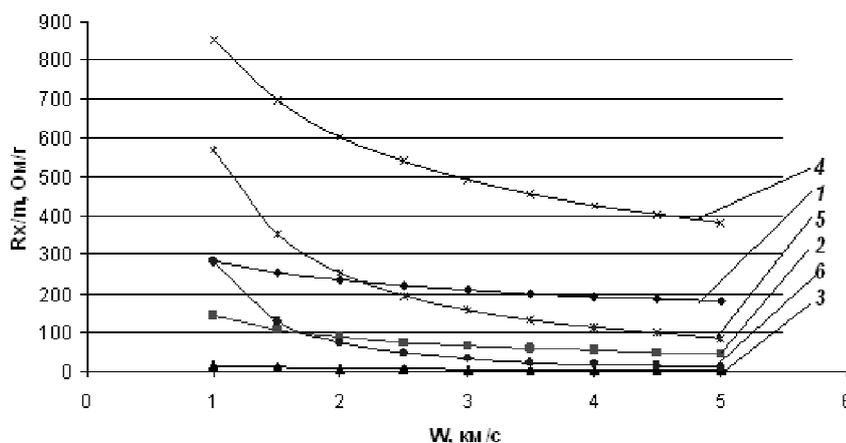


Рис. 8. Зависимость сопротивления диэлектрика, отнесённого к массе частицы, с конденсаторного датчика от скорости пылевой частицы: непробиваемый случай: 1 -  $U_0 = 75$  В, 2 -  $U_0 = 100$  В, 3 -  $U_0 = 125$  В;

пробиваемый случай: 4 -  $U_0 = 75$  В, 5 -  $U_0 = 100$  В, 6 -  $U_0 = 125$  В

### Заключение

Увеличение напряжения на конденсаторном датчике приводит к увеличению напряжённости поля внутри диэлектрика и расширяет диапазон регистрируемых частиц как по массе, так и по скорости.

Следует отметить, что механизмы, протекающие в диэлектриках при высоком динамическом давлении, еще недостаточно детально исследованы и требуют дальнейшего теоретического изучения и экспериментального исследования.

Процессы, протекающие в диэлектриках и полупроводниках в экстремальном состоянии, зависят от типа материала, величины и характера давления, внешних факторов (электрических и магнитных полей).

### Библиографический список

1. Бриджмен, Пол В., Варшауэр Д. [ред.]. Твердые тела под высоким давлением [Текст]: пер. с англ., М.: Мир. - 1966. - 524с.
2. Дремин, А. Н. Химическая физика высоких динамических давлений [Текст] / А. Н. Дремин // Хим. физика. - 2009. - Т.28. - № 4. – С. 55- 62.
3. Воскобойников, И. М. Описание состояния вещества за фронтом ударной волны [Текст] / И. М. Воскобойников, М. Ф. Гогуля // ФГВ.- 1978.-Т. 14. – С. 105-110.
4. Лачинов, А. Н. Электроника тонких слоев широкозонных полимеров [Текст] / А. Н. Лачинов, Н. В. Воробьева// УФН. – 2006. - Т.176. - №12. – С. 1249-1266.
5. Кобылкин, И. Ф. Ударные и детонационные волны. Методы исследования [Текст] / И. Ф. Кобылкин, В. В. Селиванов, В. С. Соловьев, Н. Н. Сысоев // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 376 с.
6. Каннель, Г. И. Ударные волны в физике конденсированного состояния [Текст] / Г. И. Каннель, В. Е. Фортов, С. В. Разоренов // УФН. – 2007. - Т.177. - №8. – С. 809-830.
7. Трунин, Р. Ф. Сжатие конденсированных веществ высокими давлениями ударных волн (лабораторные исследования) [Текст] / Р. Ф. Трунин // УФН.- 2001. - Т.171. - №4. – С. 387-414.
8. Альтшулер, Л. В. Развитие в России динамических методов исследований высоких давлений [Текст] / Л. В. Альтшулер, Р. Ф. Трунин, В. Д. Урлин, В. Е. Фортов, А. И. Фунтиков // УФН. -1999. - Т.169. - №3. – С. 323-343.
9. Фортов, В. Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества [Текст] / В. Е. Фортов // УФН. - 2007. - Т.177. - №4. – С. 347-368.
10. Каннель, Г. И. Ударно - волновые явления в конденсированных средах [Текст] / Г. И. Каннель, С. В. Разоренов, А. В. Уткин, В. Е. Фортов. – М.: Янус-К, 1996.- 408 с.
11. Сёмкин, Н. Д. Линейный ускоритель для моделирования микрометеоритов [Текст] / Н. Д. Сёмкин, А. В. Пияков, К. Е. Воронов, Н. Л. Богоявленский, Д. В. Горюнов // ПТЭ. -2007. - №1. – С. 1-8.
12. Novikov, J. S., Voronov, K. E., Semkin, N. D. and others. Attempt of measurement of space debris microparticles flux in Geosynchronous Orbit // Proc. Second European Conference on Space Debris, ESOC, Darmstadt, Germany 17–19 March 1997, 135–138p.
13. Сёмкин, Н. Д. Математическая модель проводимости ударносжатых пленочных МДМ – структур в условиях воздействия высокоскоростных пылевых частиц [Текст] / Н. Д. Сёмкин, А. М. Телегин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2010. - Том 13. - №4. – С. 75-79.
14. Experimental observations and computer simulations for metallic projectile fragmentation and impact crater development in thick metal targets // V. S. Hernandez et al. / International Journal of Impact Engineering 32 (2006) 1981–1999.
15. Шмачков, А. В. Одномерное газодинамическое моделирование типичных постановок ударно-волновых экспериментов через интернет [Текст] // А. В. Шмачков, П. Р. Левашов, М. Е. Поварницын, К. В. Хищенко / Тезисы XXIII международной конференции “Уравнения состояния вещества”: Эльбрус-2008. – 102 с.
16. Анучина, Н. Н. Расчетно – теоретические исследования масс – спектрометрических измерений состава пылевых частиц кометы Галлея в экспериментах “ВЕГА” [Текст] / Н. Н. Анучина, В. И. Волков, Е. Н. Евланов, В. П. Елсуков, Н. С. Еськов, О. М.

- Козырев, В. Ю. Политов, А. В. Петровцев, О. Ф. Прилуцкий, А. Т. Сапожников, М. К. Шишкарёв, А. Н. Шушлебин // Физика горения и взрыва. – 2004. - Т. 40. - №3. - С. 77-86.
17. Сёмкин, Н. Д. Взаимодействие высокоскоростных пылевых частиц с пленочной МДМ - структурой [Текст] / Н. Д. Сёмкин, К. Е. Воронов, Н. Л. Богоявленский, А. М. Телегин, М. В. Изюмов // Метрология. - 2009. - № 1. – С. 28-47.
18. Зельдович, Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений [Текст] // Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер / - М.: Наука, 1966. - 605 с.
19. Фортов, В. Е. Физика неидеальной плазмы [Текст] // В. Е. Фортов, А. Г. Храпак, И. Т. Якубов: Учеб. пособие. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 528 с.
20. Хищенко, К. В. Термодинамические свойства полиметилметакрилата при высоких температурах и давлениях в волнах ударного сжатия и разгрузки [Текст] / К. В. Хищенко, И. В. Ломоносов // Хим. физика. - 1998. - Т. 17. - № 7. – С. 74-79.
21. Воскобойников, И. М. Превращения некоторых органических соединений при ударно-волновом сжатии [Текст] / И. М. Воскобойников, О. И. Воскобойникова // Хим. физ. - 2001. - Т. 20. - № 10. – С. 70-74.
22. Зельдович, Я. Б. Температура и теплоемкость плексиглаза, сжатого ударной волной [Текст] / Я. Б. Зельдович, С. Б. Кормер, М. В. Синицын, А. И. Куряпин // Докл. АН СССР. - 1958. - Т. 122. - Вып. 1. – С. 48-50.
23. Сёмкин, Н. Д. Регистрация пылевых и газовых частиц в лабораторных и космических условиях [Текст] / Н. Д. Сёмкин, К. Е. Воронов, Л. С. Новиков – Самара: СГАУ, 2005. – 470с.
24. Сёмкин, Н. Д. Проводимость и ионообразование в ударносжатых пленочных структурах в условиях воздействия высокоскоростных пылевых частиц [Текст] / Н. Д. Сёмкин, А. М. Телегин, Р. А. Помельников // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2009. - Т. 12. - №4. – С. 92-95.
25. Сёмкин, Н. Д. Проводимость ударносжатых МДМ-структур на основе полиметилметакрилата [Текст] / Н. Д. Сёмкин, К. Е. Воронов // ЖТФ. - 1998. - Т. 68. - Вып. 8. – С. 63-66.
26. Набатов, С. С. Измерение электропроводности серы при сверхвысоких динамических давлениях [Текст] / С. С. Набатов, А. Н. Дремин, В. И. Постнов, В. В. Якушев // ЖЭТФ. – 1979. - Т. 29. - Вып. 7. – С. 407-410.
27. Гилев, С. Д. Металлизация селена при ударном сжатии [Текст] / С. Д. Гилев // ЖТФ. - 2006. - Т. 76. - Вып. 7. – С. 41-47.
28. Gilev, S. D., Mihailova, T. Yu. // J. de Physique IV 1997. Vol. 5. Colloque C3, Supplement au Journal de Physique III. N 7. 5<sup>th</sup> International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading (EURODYMAT 97), 1997, Toledo, Spain. Les Editions de Physique. P. C3-211-216.
29. Gilev, S. D. Metallurgical and Materials Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena. Proc. of the Int. Conf / Ed. by L. E. Murr, K. P. Staudhammer, M. A. Meyers. Amsterdam: Elsevier, 1995. 785-792p.
30. Гилев, С. Д. Измерение высокой электропроводности кремния в ударных волнах // С. Д. Гилев, А. М. Трубочев / ПМТФ. - 1988. - № 6. – С. 61-67.
31. Kani, K., Yamada T., Abe M. [Текст] // Shock Waves in Condensed Matter / Ed. by Y. M. Gupta. 1986. 477 -482p.
32. Bordzilovskii, S. A., Karakhanov S. M.. Electric resistance of polytetrafluoroethylene under Shock Compression // Combustion, Explosion and Compression // Vol. 38, №6, 2002. - 722-727p.
33. Осипьян, Ю. А. Электропроводность кристаллов фуллерена  $C_{60}$  при динамическом сжатии до 200 кбар [Текст] / Ю. А. Осипьян, В. Е. Фортов, К. Л. Каган, В. В. Кведер, В. И. Кулаков, А. Н. Курьянчик, Р. К. Николаев, В. И. Постнов, Н. С. Сидоров // Письма в ЖЭТФ. - 2002. - Т. 75. - Вып. 11. – С. 680-683.
34. Yakushev, V. V., Postnov V. I., V. E. Fortov, Yakysheva T. I., ЖЭТФ 90, 617 (2000). V. E. Fortov, V. Ya. Ternovoi, M. V. Zhernokletov et al., ЖЭТФ 97, 217 (2003).
35. Осипьян, Ю. А. Немонотонное изменение электропроводности кристаллов фуллерена  $C_{60}$  при динамическом сжатии до 300 кбар как свидетельство аномально сильного понижения энергетического барьера для

полимеризации  $C_{60}$  при высоких давлениях В. В. Кведер, В. Е. Фортов // Письма в [Текст] / Ю. А. Осипьян, Б. В. Авдонин, К. Л. ЖЭТФ. - 2005. - Т. 81. - Вып. 9. - С. 587-590.  
Каган, Р. К. Николаев, В. И. Постнов, Н. С. Сидоров, Д. В. Шахрай, А. Ф. Шестаков,

## REVIEW OF RESEARCH CONDUCTIVITY OF DIELECTRICS AND SEMICONDUCTORS UNDER HIGH PRESSURE

© 2011 A. M. Telegin, M. P. Kalaev, N. D. Semkin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev  
(National Research University)

The review of researches conductivity dielectrics and semiconductors at high pressures.  
Research methods are listed. Experimental data and theoretical models are presented.

*Conductivity, high pressure, high-speed collision, the accelerator.*

### Информация об авторах

**Сёмкин Николай Данилович**, профессор кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, доктор технических наук, Самарский государственный аэрокосмический университет имени С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [semkin@ssau.ru](mailto:semkin@ssau.ru). Область научных интересов: высокоскоростной удар, масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

**Телегин Алексей Михайлович**, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [talex85@mail.ru](mailto:talex85@mail.ru). Область научных интересов: высокоскоростной удар, космическое приборостроение.

**Калаев Михаил Павлович**, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sgau5@yandex.ru](mailto:sgau5@yandex.ru). Область научных интересов: высокоскоростной удар, космическое приборостроение.

**Semkin Nikolay Danilovich**, professor of department radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after S. P. Korolev (national research university). E-mail: [semkin@ssau.ru](mailto:semkin@ssau.ru). Area of research: high-speed impact, mass spectrometry, space instrumentation.

**Telegin Aleksey Mikhailovich**, post-graduate of department radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after S. P. Korolev (national research university). E-mail: [talex85@mail.ru](mailto:talex85@mail.ru). Area of research: high-speed impact, space instrumentation.

**Kalaev Mikhail Pavlovich**, post-graduate of department radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after S. P. Korolev (national research university). E-mail: [sgau5@yandex.ru](mailto:sgau5@yandex.ru). Area of research: high-speed impact, space instrumentation.

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

© 2011 А. В. Костин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Рассмотрены классические методы защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов от воздействия факторов электростатических разрядов путём создания однородного экрана. Отмечены их достоинства и недостатки. Найдены спектры помех, излучаемых при электростатическом разряде. Предложены альтернативные методы защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов от воздействия факторов электростатических разрядов, лишённые недостатков, присущих классическому методу. Приведены рекомендации по выбору того или иного метода защиты.

*Бортовая аппаратура, космический аппарат, электростатический разряд, электромагнитная помеха, электромагнитное поле, спектр, частота, длина волны, напряжённость, магнитный поток, ЭДС, сила тока.*

Бортовая аппаратура (БА) космических аппаратов (КА) развивается в сторону внедрения цифровых технологий, повышения тактовых частот обработки информации, расширения спектра обрабатываемых сигналов. Одновременно минимизируются массогабаритные параметры аппаратуры, увеличивается плотность ее компоновки в объеме КА. Все это создает сложную обстановку с позиций электромагнитной совместимости (ЭМС) приборов и узлов БА. Особую роль при этом играют процессы электризации поверхности КА, вызывающие электростатические разряды (ЭСР) на поверхности блоков и кабельных систем. ЭСР, возникающие вследствие дифференциальной зарядки КА, являются источниками электромагнитных помех (ЭМП), воздействующих на отдельные элементы и устройства и (или) бортовые системы в целом.

Из-за высокой сложности реальных конструкций КА задача определения места разряда и его уровня достаточно сложна и на сегодняшний день не отработана. Это затрудняет разработку методов и средств предотвращения ЭСР и, соответственно, защиты аппаратуры от его воздействия. Классическим методом предотвращения ЭСР является исключение разности потенциалов между элементами конструкции путём их электрического соединения (металлизации) между собой и с корпусом КА. Детали КА, изготов-

ленные из изоляционных материалов, металлизуются нанесением электропроводящего покрытия как по всей поверхности, так и частично, в зависимости от требований к физическим свойствам этих деталей.

Однако не все детали можно металлизировать ввиду технических требований, предъявляемых к ним. Например, общие шины приборов изолируются от корпуса КА, изоляторы нельзя покрывать электропроводящим покрытием, так как это может привести к снижению сопротивления изоляции, есть ограничения на покрытие радиопрозрачных деталей, так как электропроводящее покрытие может снизить радиопрозрачность. Примеров можно привести множество. Кроме того, ЭСР могут возникать между окружающей КА плазмой и корпусом самого КА. Другими словами, можно только снизить вероятность возникновения ЭСР, но исключить его полностью нельзя.

Корпуса БА КА как правило металлические и играют роль экранов для ЭМП, вызванных ЭСР. ЭМП могут проникать сквозь экран и через его неоднородности (щели и отверстия). Даже если конструкцией корпуса БА не предусмотрено неоднородностей, они имеются в местах разборных соединений элементов конструкции корпуса. Это связано с тем, что электрическое соединение обеспечивается не по всем плоскостям сопряжения

деталей ввиду наличия допусков формы. ЭМП, проникшие через экран, вызывают наводки в проводах и печатных проводниках, расположенных внутри БА. Эти наводки могут вызвать сбои БА или даже отказы.

Классическим методом защиты БА от электромагнитного поля, вызванного ЭСР, является создание однородного экрана. Такие методы обеспечивают наилучшую защиту, но имеют ряд недостатков. Рассмотрим самые распространённые методы создания однородного экрана:

- сварка и пайка сопрягаемых деталей;
- электропроводящие прокладки;
- электропроводящие клейкие ленты;
- электропроводящие клеи.

Сварка и пайка сопрягаемых элементов конструкции БА приводит к снижению ремонтпригодности и технологичности. Чтобы сварить или спаять детали корпуса из алюминиевых сплавов (в основном применяется этот материал как наиболее лёгкий, дешёвый и достаточно прочный), необходимо специальное оборудование, флюсы, припой и т.д. Кроме того, нагрев корпуса БА при этих операциях может вызвать отказ электрорадиоизделий (ЭРИ), чувствительных к температурным воздействиям. А если ЭРИ не откажут, то и показатели надёжности могут снизиться.

Применение прокладок из упругих электропроводящих материалов позволяет сохранить ремонтпригодность и исключить температурное воздействие на БА. Такой вариант позволяет обеспечить нормальный электрический контакт по всей поверхности сопрягаемых деталей, а значит и исключить щели и отверстия, вызванные допусками на сопрягаемые поверхности. Тем не менее, технологичность такой БА тоже невысокая, ввиду необходимости изготовления прокладок и канавок в сопрягаемых деталях для её размещения. Необходимость изготовления канавок зачастую приводит к увеличению габаритов и масс, так как требует увеличения площади сопряжения.

Существуют такие материалы, как электропроводящие клейкие ленты. Они представляют собой диэлектрический материал с нанесённым на него металлическим напылением с одной стороны и клейкой мас-

сой с другой стороны. Заклеив такой плёнкой отверстия, необходимо электрически соединить металлическое напыление плёнки с корпусом БА. Кроме того, необходимо предупредить отслаивание плёнки от корпуса. Последнее характерно и для электропроводящих клеев, что ограничивает их применение. Отслаивание может происходить ввиду снижения адгезии из-за нарушения технологии подготовки поверхности к склеиванию. К сожалению, на отечественных предприятиях такое случается. Отделение электропроводящего материала на этапе выведения и орбитального полёта может привести к короткому замыканию жизненноважных электрических цепей, снижению сопротивления изоляции и, как следствие, даже потере КА. Ремонтпригодность БА при применении таких методов защиты средняя, масса почти не увеличивается или увеличивается незначительно.

Если отверстия необходимы и закрывать их нельзя (например, отверстия для оттока воздуха), то они выполняются в виде лабиринтов. ЭМП, пройдя через такой лабиринт, многократно отражается и её энергия уменьшается. Ремонтпригодность корпусов с лабиринтами обеспечивается, но технологичность невысока. Кроме того, отверстие даже с лабиринтом нарушает однородность экрана. В ряде случаев полностью однородный экран создать вообще невозможно.

Прежде чем сделать выбор того или иного метода создания однородного экрана, необходимо определиться с необходимостью применения однородного экрана для защиты БА. Рассмотрим источник помех, то есть ЭСР и конструкцию прибора. Известно, что сила тока разрядного импульса имеет вид

$$i_p(t) = I \cdot (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}), \quad (1)$$

где  $t$  – время,  $I$ ,  $p_1$ ,  $p_2$  можно найти по известным значениям амплитуды импульса, длительности импульса по уровню 0,5 и длительностью фронта по уровням 0,1...0,9. На рис. 1 представлены временные диаграммы импульсов разрядной силы тока при минимальной (а) и максимальной (б) значениях длительности фронта импульса, максимальной амплитуде и минимальной длительности фронта импульса. Максимальная амплитуда и минимальная длительность выбраны как

худший случай. При максимальной амплитуде энергия импульса максимальна, а при минимальной длительности фронта спектр будет самым широким.

Выражение (1) подвергнем преобразованию Фурье и найдём спектральную плотность тока разрядного импульса:

$$\begin{aligned} \dot{I}_P(j\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} i_P(t) e^{-j\omega t} dt = \\ &= I \frac{p_1 - p_2}{\sqrt{p_1^2 + \omega^2} \sqrt{p_2^2 + \omega^2}} e^{j \left[ \arctg \left( \frac{\omega}{p_1} \right) + \arctg \left( \frac{\omega}{p_2} \right) \right]}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $j = \sqrt{-1}$  - мнимая единица,  $\omega$  - угловая частота. Амплитудный спектр (выражение, которое стоит перед экспонентой) монотонно убывает с ростом частоты. На рис. 2 представлены амплитудные спектры импульсов с самой большой длительностью (сплошная линия) и самой маленькой длительностью (пунктирная линия).

Найдём эффективную ширину спектра разрядного импульса по уровню 99% энергии. Задав такую границу, можно точно сказать, что энергия спектральных составляющих, не вошедших в эффективную ширину спектра, много меньше энергии эффективной ширины спектра (на два порядка). Для этого решим уравнение относительно максимальной частоты эффективной ширины спектра разрядного импульса  $\omega_{MAX}$ :

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_{MAX}} |\dot{I}_P(j\omega)|^2 d\omega = \frac{0,99}{\pi} \int_0^{\infty} |\dot{I}_P(j\omega)|^2 d\omega. \quad (3)$$

Расчёты показывают, что  $f_{MAX} = \omega_{MAX}/2\pi = 6,92$  МГц для импульса самой большой длительности и  $f_{MAX} = 168,3$  МГц для импульса самой маленькой длительности. Поскольку рассматриваемые импульсы являются видеоимпульсами, то минимальная частота эффективной ширины спектра  $f_{MIN} = 0$ . Ширина спектра импульса с самой маленькой длительностью значительно больше, чем ширина спектра импульса с самой большой длительностью, однако энергия этого импульса значительно меньше. На рис. 3 представлены энергетические спектры импульсов с самой большой длительностью (сплошная

линия) и самой маленькой длительностью (пунктирная линия). Из-за большей энергии самым худшим вариантом является импульс с максимальной длительностью.

ЭСР можно представить в виде элементарного электрического излучателя (диполя Герца). Поскольку размеры КА соизмеримы с длиной волны даже для  $f_{MAX} = 168,3$  МГц ( $\lambda = 1,78$  м), то можно сказать, что БА будет расположена в ближней зоне диполя Герца. Амплитуда напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$  в ближней зоне не зависят от частоты [1]. Амплитуда напряжённости электрического поля  $\vec{E}$  в ближней зоне обратно пропорциональна частоте [1]. Поэтому найденные значения  $f_{MIN}$  и  $f_{MAX}$  справедливы как для импульса силы тока, так и для напряжённости  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ .

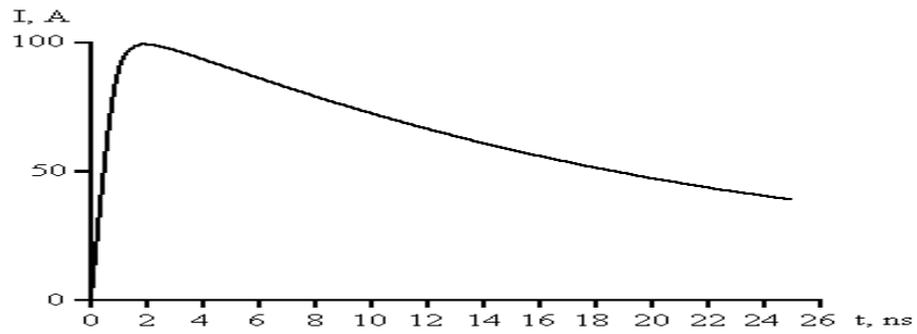
Если размеры неоднородностей корпуса прибора много меньше длины волны, соответствующей  $f_{MAX}$ , то экран можно считать однородным и расчёт его эффективности вести по методике расчёта однородного экрана [2]. Если эффективности экрана недостаточно, так как в спектре имеются составляющие и низкочастотные и высокочастотные, то экраны целесообразно делать многослойными [3].

Рассмотрим приёмники помех. В приборах основными приёмниками помех являются провода и печатные проводники. Представим контур, образованный источником сигнала, нагрузкой, сигнальным и общим проводом (рис. 4). Поверхность, ограниченную контуром, линии напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$  пересекают под произвольным углом.

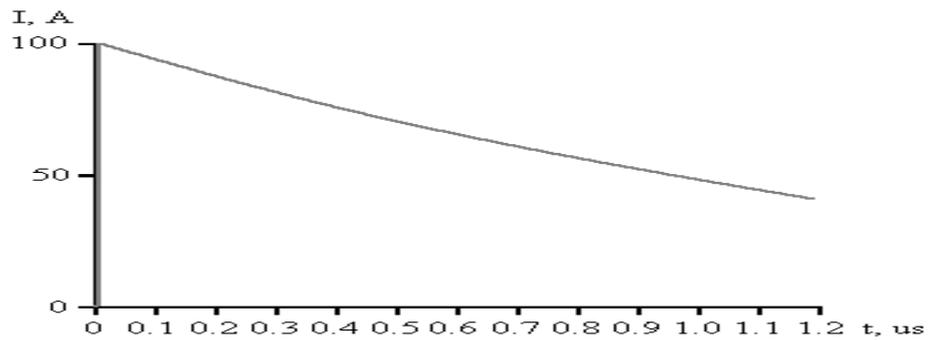
В соответствии с законом Фарадея и учитывая выражение для потока вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  (магнитного потока), можно записать формулу для ЭДС, наводимой в контуре

$$e(t) = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S} = - \mu_0 \frac{d}{dt} \int_S \mu \vec{H} d\vec{S}, \quad (4)$$

где  $\mu_0$  - магнитная постоянная,  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость (для вакуума и воздуха равна единице).



а)



б)

Рис. 1. Временные диаграммы импульсов разрядной силы тока:  
а) при минимальной длительности импульса;  
б) при максимальной длительности импульса

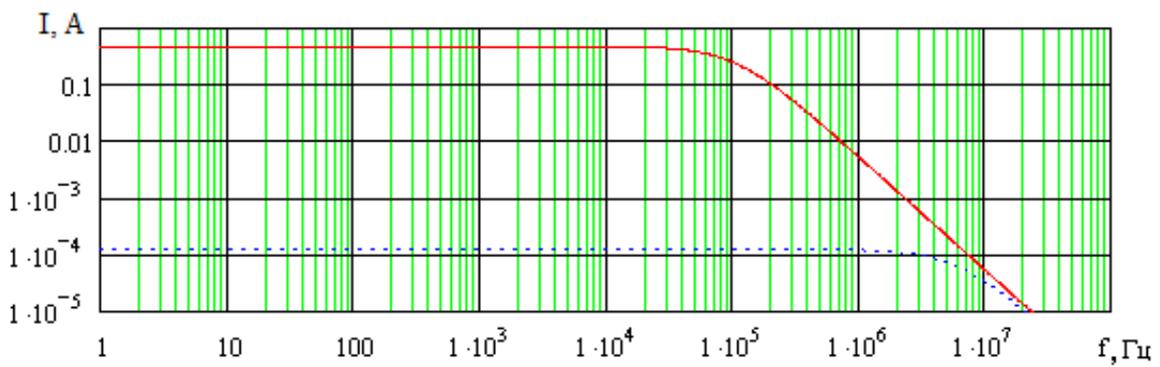


Рис. 2. Амплитудные спектры импульсов

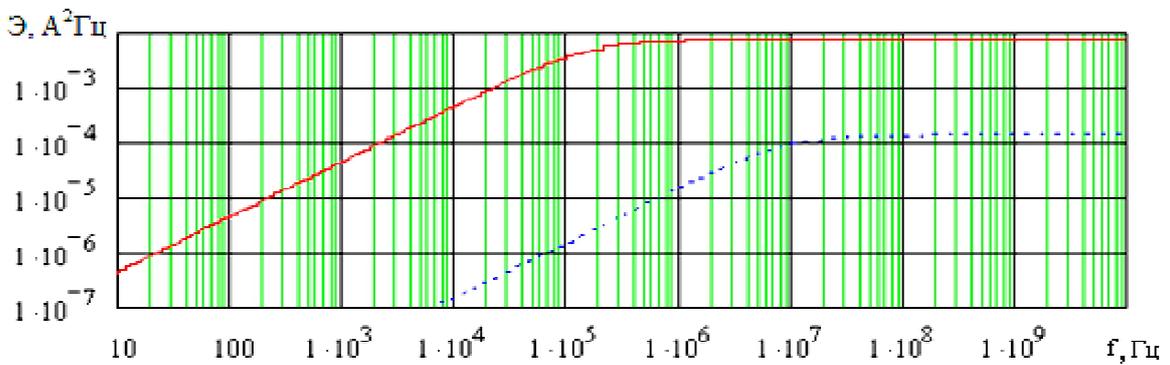


Рис. 3. Энергетические спектры импульсов

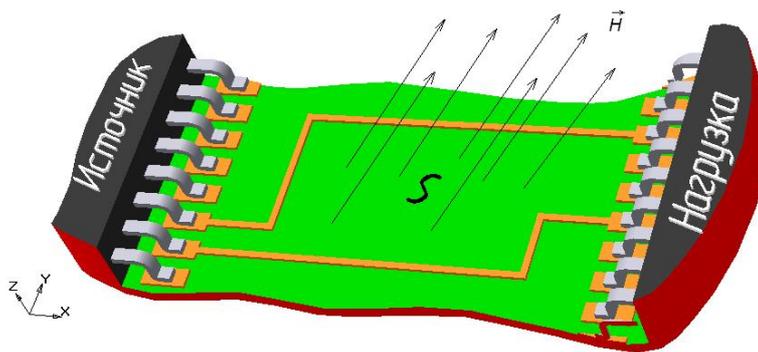


Рис. 4. Приёмник помехи

Если раскрыть поверхностный интеграл, то окажется, что он обращается в ноль, если проекция вектора  $\vec{H}$  на ось  $Z$  равна нулю. Иначе силовые линии  $\vec{H}$  не пересекают площадку  $S$ , а расположены параллельно. При этом  $e(t)$  тоже обращается в ноль. Таким образом, одним из вариантов защиты БА КА от факторов ЭСР является ориентация контуров проводов и печатных проводников вдоль силовых линий магнитного поля. Для этого необходимо знать структуру поля внутри БА. Структуру поля можно найти приближённо, если представить БА в виде полового металлического резонатора, возбуждаемого щелью или отверстием, по граничным условиям на стенках резонатора. Поле резонатора будет неоднородным, будут наблюдаться узлы и пучности поля. Особо чувствительные к помехам цепи целесообразно располагать в узлах поля. Метод защиты, связанный с ориентацией чувствительных к помехам цепей, практически полностью лишён недостатков, присущих рассмотренным в начале настоящей статьи методам.

Другой способ снижения помех - это уменьшение площади поверхности  $S$ . Он тоже следует из выражения (4). Необходимо исключить возможность пересечения поверхности  $S$  конструктивными элементами и магнитопроводами из ферромагнитного материала, у которого  $\mu$  значительно больше единицы. И это следует из выражения (4). Поскольку полости большинства БА являются полым металлическим резонатором, то на резонансных частотах может произойти резкое возрастание уровней напряжённости

поля, а значит и уровня помех. Очевидно, что БА с меньшими геометрическими размерами полостей будет более устойчива к факторам ЭСР, так как уменьшение размеров резонатора приводит к смещению резонансных частот в область более высоких частот, а на более высоких частотах, как было показано ранее, амплитуда излучаемых гармоник ниже. Перечисленные выше методы являются альтернативой однородного экранирования. Они не ухудшают технологичность, ремонтпригодность, не увеличивают массу и размеры, не ухудшают надёжность БА КА.

Итак, перед тем как сделать из корпусов БА КА однородный экран, необходимо провести анализ, который бы показал необходимость принятия каких-либо мер защиты (возможно, что корпус БА, который является неоднородным экраном, обеспечивает требуемую защиту). Если требуемая защита не обеспечивается, то необходимо рассмотреть варианты защиты, не снижающие технологичности, надёжности и не ухудшающие массогабаритные характеристики. К таким методам защиты относятся альтернативные методы, некоторые из них описаны в настоящей статье. Если этих мер недостаточно, то необходимо локальное экранирование узлов, чувствительных к помехам. Наконец, если вся БА состоит из таких узлов, а другими методами обеспечить требуемую защиту не удалось, то необходимо создавать однородный экран, несмотря на недостатки этого метода. Но последний следует применять только в самых необходимых случаях.

**Библиографический список**

1. Фёдоров, Н. Н. Основы электродинамики: Учебное пособие для вузов [Текст] / Н. Н. Фёдоров. - М.: Высшая школа, 1980.-399 с.

2. Полонский, Н. Б. Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / Н. Б. Полонский.-М.: Сов. радио, 1979.-216 с.

3. Сафонов, А. Л. Прямоугольные электрические соединители. Защита от электромагнитных помех с помощью экранов и встроенных фильтров [Текст] / А. Л. Сафонов, Л. И. Сафонов // Технологии в электронной промышленности.- №8(44), 2010. – С. 38-45.

**THE ANALYSIS OF METHODS OF PROTECTION OF ONBOARD EQUIPMENT OF SPACE VEHICLES FROM INFLUENCE OF FACTORS OF THE ELECTROSTATIC DISCHARGE**

© 2011 A. V. Kostin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

This article describes classical methods of protection onboard equipment space vehicles from influence of factors electrostatic discharges by making the homogeneous screen, their merits and demerits. Spectrums of noises which are radiated at the electrostatic discharge are discovered. Researcher have offered are alternative methods of protection onboard equipment space vehicles from influence of factors electrostatic discharges deprived lacks inherent in a classical method. It results are recommendations for choice method of protection.

*Onboard equipment, the space vehicle, electrostatic discharge, electromagnetic noise, electromagnetic field, spectrum, frequency, wavelength, intensity, magnetic flow, EMF, current strength.*

**Информация об авторе**

**Костин Алексей Владимирович**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [xpehbam27@yandex.ru](mailto:xpehbam27@yandex.ru). Область научных интересов: повышение устойчивости бортовой аппаратуры космических аппаратов к внешним воздействующим факторам.

**Kostin Aleksey Vladimirovitch**, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [xpehbam27@yandex.ru](mailto:xpehbam27@yandex.ru). Area of research: increase of stability of onboard equipment of space vehicles to external influencing factors.

## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА ВДОЛЬ ОСИ КАНАЛА ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ МИКРОСБОРОК

© 2011 А. В. Столбиков, М. Н. Пиганов, А. В. Костин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Рассмотрены вопросы построения математической модели распределения температуры газа вдоль оси факельного разряда при взаимодействии с пленочными структурами радиоэлектронных устройств. Для построения модели применена цилиндрическая система координат с началом в точке пересечения оси факела с внешней плоской границей пленки. Взаимодействующая система представлена в виде системы «нагретое тело цилиндрической формы – полуограниченный массив».

*Факельный разряд, математическая модель, температура факела, взаимодействие с пленкой.*

Высокочастотный факельный разряд (ВЧФР), как известно, имеет вид тонкого яркого шнура, окруженного менее яркой оболочкой. При воздействии ВЧФР на толстую резистивную пленку локальный участок последней в месте их взаимодействия будет представлять собой совокупность зон с различными фазовыми и переходными состояниями вещества резистивной пленки. Центральная зона будет областью испаренного вещества резистивной пленки, затем идут зоны интенсивного испарения, переходная к жидкой фазе, плавления и нагрева, где происходит изменение температуры от точки плавления  $T_n$  резистивного материала до окружающей среды  $T_o$  в сторону периферийных участков пленки.

Отметим, что взаимодействие факельного разряда происходит вначале с плоской поверхностью и продукты разрушения распределяются по полусфере. В процессе формирования кратера происходит уменьшение угла распределения удаленного за пределы локальной области резистивного вещества. Форма и соотношение размеров кратера зависят от теплофизических характеристик материала. При построении и составлении математической модели учтём конвекцию вдоль оси разряда и излучение оболочки факела в окружающее пространство.

При построении данной модели удобно применить цилиндрическую систему координат с началом в точке пересечения оси факела с внешней плоской границей пленки. Ось  $Z$  совместим с осью высокочастотного факельного разряда, при этом за положительное направление оси выберем направление распространения разряда. Эта система удобна уже тем, что ни одна из физических характеристик в этом случае не зависит от угла.

Рассмотрим действие высокочастотного факельного разряда (ВЧФР) на резистивную пленку в течение времени  $\tau < \tau_o$ , где  $\tau_o$  - полное время взаимодействия. Отметим здесь, что площадь испаряемого участка  $S_{ис}$ , а значит и масса этого участка пленки  $m_{ис}$  при известной толщине последней  $h$  считаются заданными за время  $\tau_o$ .

Общее уравнение теплового баланса запишем в следующем виде:

$$\operatorname{div}(\lambda_{\phi} \operatorname{grad} T_z) \tau = \sigma \cdot \tau \cdot E^2 - C_{\phi} \rho_{\phi} \tau (V_z \frac{\partial T_z}{\partial z} + V_r \frac{\partial T_z}{\partial r}) - \sum_{i=1}^6 Q_i, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\phi}$  - теплопроводность факела;  $T_z$  - температура на оси исследуемой области;  $\sigma$  - электропроводность канала факела;  $E$  - напряжённость электромагнитного поля;  $C_{\phi}$  - удельная теплоёмкость окружающей среды;  $\rho_{\phi}$  - плотность окружающей среды;  $V_z, V_r$  - осевая и радиальная составляющая скорости

конвекционного потока;  $Q_i$  - расход энергии на  $i$ -ые теплофизические процессы, связанные с изменением агрегатного состояния отдельных зон изучаемого участка пленки в месте взаимодействия с ВЧФР.

Опуская непосредственные выводы  $Q_i$ , запишем лишь их окончательные выражения.

На испарение  $m_u$  за  $\tau$  идет

$$Q_1 = L_u m_u, \tag{2}$$

где  $L_u$  - удельная теплота испарения резистивного материала:

$$m_u = m_{uo} \tau \tau_o^{-1}. \tag{3}$$

Для нагрева  $m_u$  и массы части жидкой фазы пленки зоны интенсивного испарения  $m_{nm}$  с  $T_n$  до температуры испарения  $T_u$  необходимо

$$Q_2 = C_{nr}(T_u - T_n)(m_u + k_{l_{nm}} m_{nm}), \tag{4}$$

где  $k_{l_{nm}}$  учитывает неравномерность нагрева.

Для плавления резистивного материала и нагрева его до этой температуры имеем соответственно:

$$Q_3 = L_n[(m_u + k_{l_{nm}} m_{nm}) + k_{l_n} m_n] \tag{5}$$

$$\text{и } Q_4 = C_R[m_u + k_{l_{nm}} m_{nm} + k_{l_n} m_n](T_n - T_0), \tag{6}$$

где  $L_n$  - удельная теплота плавления материала резистивной пленки;  $C_R$  - его удельная теплоемкость;  $m_n$  - масса расплавляемого участка;  $k_{l_n}$  учитывает неравномерность плавления.

Энергия, идущая на нагрев периферийных участков кратера (локальной области взаимодействия ВЧФР с резистивной пленкой), находится при рассмотрении этой системы в виде: «нагретое тело цилиндрической формы - полуограниченный массив».

Имеем:

$$Q_5 = 2\pi\tau h C_R^2 \rho_R^2 T_o (R_H - R_{II})^2 \ln \frac{4h}{R_U + R_{II}} [\lambda_R - C_R \rho_R (R_U - R_{II})] \ln \frac{4h}{R_U + R_{II}}, \tag{7}$$

где  $R_H, R_{II}, R_U$  - радиусы соответствующих зон;  $\lambda_R$  - теплопроводимость материала резистивной пленки.

Энергия излучения оболочки факела

$$Q_6 = 2\pi\epsilon\epsilon_0 C_0 l R_{o\phi} (T_\phi^4 - T_o^4) \varphi \cdot 10^{-8}, \tag{8}$$

где  $R_{o\phi}$  - радиус оболочки свободного факела;  $\varphi$  - коэффициент облученности;  $\epsilon$  - приведенная степень черноты системы оболочка -

ВЧФР;  $C_0$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $l$  - расстояние от острия электрода до поверхности резистивной пленки;  $T_\phi$  - температура факела у острия электрода.

Отметим, что учёт взаимодействия частиц на молекулярном уровне сильно усложняет математические исследования температурного поля. Получение аналитического решения становится весьма проблематичным, поэтому влияния некоторых процессов отражено не будет. Левую часть (1) в соответствии с [1] и с учётом [2,3] запишем в виде

$$\text{div}(\lambda_o \text{grad} T_z) = \rho_A \cdot \tilde{N}_A \cdot V_z \frac{\partial T_z}{\partial z} + \rho_A V_z^2 \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_o \frac{\partial T_z}{\partial z}). \tag{9}$$

Рассмотрим случай  $V_z = \text{const}$ , т.е.

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} = 0. \tag{10}$$

Отметим, что радиальной конвекционной составляющей можно пренебречь [2].

Примем для электропроводности экспоненциальную зависимость от температуры  $\delta = a e^{BT_z}$  и представим ее в виде ряда

$$\delta = \sum_{n=0}^{\infty} a \frac{(bT_z)^n}{n!}. \tag{12}$$

Выразим все массы через  $m_u$  с помощью  $k_{2i}$ -соответствующих коэффициентов соотношения масс (заметим, что они зависят от соотношения радиусов зон).

Примем

$$k_{li} k_{2i} = K_i \tag{13}$$

С учётом вышеизложенных выражений уравнение (1) имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\lambda_\phi \frac{\partial T_z}{\partial z}) = a E^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(bT_z)^n}{n!} - 2\rho_B \cdot C_B \cdot V_z \frac{\partial T_z}{\partial z} - \alpha C_0 2\pi R_{o\phi} \varphi \cdot 10^8 (T_\phi^4 - T_o^4) - \frac{\rho_R h S_U}{\tau_o} \{L_U + C_{IR}(T_U - T_o)\} \times (1 + k_{III}) + [(L_{II} + C_R(T_{II} - T_o))(1 + k_{III} + k_{II})] + \frac{2\pi h T_o \ln \frac{4h}{R_U + R_{II}} \cdot [C_R \rho_R (R_H - R_{II})]^2}{\lambda_R - \rho_R C_R (R_H - R_{II}) \ln \frac{4h}{R_U + R_{II}}}. \tag{14}$$

Для разрешения вышеописанного дифференциального уравнения относительно  $T_z$

применяются общие методы решения таких уравнений. Решение представляется в виде суммы общего и частного решений. При нахождении частного решения и коэффициентов в общем решении используются считающиеся известными данные о температурах:  $T_\phi$  - температуре в начальной точке у основания факела и  $T_0$  - в точке  $Z_0 = h + h_{II}$ . Опуская подробные выкладки поиска решений, представим окончательный вид распределения  $T_z$  по оси  $Z$ , удобный для восприятия:

$$T_z = A \cdot e^{\alpha \cdot z} + B \cdot e^{-\beta \cdot z} + C, \quad (15)$$

где

$$A = \frac{T_0 e^{\frac{h+h_{II}}{2} \left[ \sqrt{\left(\frac{2\rho_\phi C_\phi V_z}{\lambda_\phi}\right)^2 + \frac{4abE^2}{\lambda_\phi}} - \frac{2\rho_\phi C_\phi V_z}{\lambda_\phi} \right] - T_\phi}{e^{(h+h_{II}) \left[ \sqrt{\left(\frac{2\rho_\phi C_\phi V_z}{\lambda_\phi}\right)^2 + \frac{4abE^2}{\lambda_\phi}} - 1 \right]}}; \quad (16)$$

$$B = \frac{T_\phi e^{(h+h_{II}) \left[ \sqrt{\left(\frac{2\rho_\phi C_\phi V_z}{\lambda_\phi}\right)^2 + \frac{4abE^2}{\lambda_\phi}} + \frac{2\rho_\phi C_\phi V_z}{\lambda_\phi} \right] - T_0}{e^{(h+h_{II}) \left[ \sqrt{\left(\frac{2\rho_\phi C_\phi V_z}{\lambda_\phi}\right)^2 + \frac{4abE^2}{\lambda_\phi}} - 1 \right]}} \times$$

$$\times \frac{T_0 e^{\frac{h+h_{II}}{2} \left[ \sqrt{\left(\frac{2\rho_\phi C_\phi V_z}{\lambda_\phi}\right)^2 + \frac{4abE^2}{\lambda_\phi}} - \frac{2\rho_\phi C_\phi V_z}{\lambda_\phi} \right] - T_\phi}{e^{(h+h_{II}) \left[ \sqrt{\left(\frac{2\rho_\phi C_\phi V_z}{\lambda_\phi}\right)^2 + \frac{4abE^2}{\lambda_\phi}} - 1 \right]}}$$

$$C = \frac{2\pi \cdot z \cdot T_0 \ln \frac{4h}{(R_U + R_{II})} [C_R \rho_R (R_U + R_{II})]^2}{abE^2 [\lambda_R - C_R \rho_R (R_U + R_{II})] \ln \frac{4h}{(R_U + R_{II})}} -$$

$$- \frac{1}{\epsilon} + \frac{2\epsilon \cdot C_0 \pi \cdot R_0 \phi \cdot l (T_\phi^4 - T_0^4)}{ab \cdot 10^8 E^2} - \frac{Z \rho_R S_4}{ab\tau \cdot E^2} [L_U + C_{IR}(T_U - T_{II})] (1 + K_{III}) + (1 + K_{II} + K_{III}) \times (L_{II} + C_R (T_{II} - T_0)); \quad (17)$$

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{\rho_\phi C_\phi V_z}{\lambda_\phi}\right)^2 + \frac{abE^2}{\lambda_\phi}} - \frac{\rho_\phi C_\phi V_z}{\lambda_\phi}; \quad (18)$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{2\rho_\phi C_\phi V_z}{\lambda_\phi}\right)^2 + \frac{abE^2}{\lambda_\phi}} + \frac{\rho_\phi C_\phi V_z}{\lambda_\phi}. \quad (19)$$

### Библиографический список

1. Трехов, Е. С. К теории высокочастотного факельного разряда в воздухе [Текст] / Е. С. Трехов, Е. Л. Тюрин, Е. П. Фетисов // Физика газоразрядной плазмы.-М.: Атомиздат, 1969.- Вып.2.- С. 148-155.

2. Качанов, А. В. Некоторые вопросы генерации плотных плазменных струй в проточном высокочастотном факельном разряде [Текст] / А. В. Качанов, Е. С. Трехов, Е. Л. Тюрин, Е. П. Фетисов // Физика газоразрядной плазмы. - М.: Атомиздат, 1968. - Вып.1.- С. 52-59.

3. Качанов А. В. Электродинамическое описание высокочастотного факельного разряда [Текст] / А. В. Качанов, Е. С. Трехов, Е. П. Фетисов // Физика газоразрядной плазмы.-М.: Атомиздат, 1968.- Вып.1.- С. 39-47.

## BUILD-UP MATHEMATICAL MODEL OF ALLOCATION TEMPERATURE GAS ALONG AN AXIS THE CHANNEL A TORCH DISCHARGE AT INTERACTION WITH THICK-FILM DEVICES OF MICROASSAMBLY

© 2011 A. V. Stolbikov, M. H. Piganov, A. V. Kostin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

This article analyses questions of build-up mathematical model allocation temperature gas along an axis the channel a torch discharge at interaction with film structures of radio-electronic devices. The cylindrical system of co-ordinates is applied to model build-up with the beginning in an intersection point of axis torch with exterior flat boundary film. The interacting system is presented in a view «warmed up body of the cylindrical shape - semirestricted file».

*Torch discharge, mathematical model, torch temperatures, interaction with film.*

**Информация об авторах**

**Столбиков Александр Владимирович**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: точность тонкопленочных микросборок.

**Пиганов Михаил Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [piganov@ssau.ru](mailto:piganov@ssau.ru). Область научных интересов: надёжность и качество радиоэлектронных средств.

**Костин Алексей Владимирович**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [xpehbam27@yandex.ru](mailto:xpehbam27@yandex.ru). Область научных интересов: повышение устойчивости бортовой аппаратуры космических аппаратов к внешним воздействующим факторам.

**Stolbikov Aleksandr Vladimirovich**, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: accuracy of thin-film micro.

**Piganov Mikhail Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor, head of design and production radio-electronic means, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [piganov@ssau.ru](mailto:piganov@ssau.ru). Research interests: quality and reliability of radio electronic equipment.

**Kostin Aleksei Vladimirovich**, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [xpehbam27@yandex.ru](mailto:xpehbam27@yandex.ru). Research interests: increasing the stability of the onboard equipment of spacecraft to external factors.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА С ЭЛЕМЕНТАМИ КОНСТРУКЦИИ РАДИОАППАРАТУРЫ

© 2011 А. В. Костин, М. Н. Пиганов, А. В. Столбиков

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Проведено математическое моделирование взаимодействия высокочастотного факельного разряда с элементами конструкции радиоаппаратуры типа «толстая резистивная пленка». Исследовано взаимодействие факельного разряда с пленочными структурами. Получено математическое выражение, которое связывает все физические и геометрические параметры системы «разряд-пленка-подложка» и технологический параметр.

*Моделирование, факельный разряд, элемент конструкции радиоаппаратуры, взаимодействие, математическая модель.*

В настоящее время в микроэлектронной технологии находят широкое применение эрозионные методы обработки тонких и толстых пленок. Весьма перспективным методом обработки, в первую очередь с целью обеспечения требуемой точности номиналов элементов, является метод факельного разряда [1,2].

Однако в литературе не описаны математические модели взаимодействия такого разряда с тонкой и толстой резистивной пленкой, необходимые для нахождения оптимальных режимов и автоматизации процесса подгонки.

В данной работе проведено исследование взаимодействия высокочастотного факельного разряда (ВЧФР) с толстой резистивной пленкой, на основе которого получена требуемая математическая модель.

Известно, что высокочастотный факельный разряд имеет вид тонкого яркого шнура, окруженного менее яркой оболочкой, поэтому большое количество энергии, передаваемое таким разрядом пленке, вызывает сильный перегрев на локальном участке последней. Введенная в пленку энергия расходуется на проплавление материала на заданную глубину, на удаление объема вещества, занимаемого каналом, плавление приканальной области материала и отвод тепла в периферийные участки в течение времени действия источника энергии.

Примем следующую физическую модель: при воздействии факельного разряда на толстую резистивную пленку локальный участок последней в месте их взаимодействия будет представлять собой совокупность зон с различными фазовыми и переходными состояниями вещества резистивной пленки. Схематическое изображение этих зон приведено на рис.1. Зона I представляет собой зону испаренного вещества резистивной пленки, а зона II — область интенсивного испарения. Следует отметить, что эти участки различаются лишь концентрацией частиц испаряемого вещества. В зоне IV происходит плавление материала пленки, а область III представляет собой переходную зону от жидкой до газообразной фаз резистивного вещества, где происходит его дальнейшее нагревание. Отметим также, что тепло, ушедшее в стенки, расходуется не только на плавление, но и отводится теплопроводностью вглубь материала пленки, поэтому для увеличения достоверности результатов учтём влияние теплопроводности металлической пленки в виде наличия зоны V, в которой происходит спад температуры от точки плавления до температуры окружающей среды в сторону периферийных участков пленки. Необходимо отметить, что границы зон показаны условно, характер их изменения с течением времени на рисунке также не отражен.

Для данной модели удобно применить цилиндрическую систему координат. Ось  $Z$  системы совместим с осью высокочастотного факельного разряда, направленной перпендикулярно плоскости поверхности пленки. За положительное направление оси выберем направление распространения разряда. Точку начала координат совместим с острием электрода. Эта система удобна уже тем, что ни одна из физических характеристик в этом случае не зависит от угла  $\theta$ . Очевидно, что длина канала факельного разряда во время воздействия на толстую резистивную пленку меньше, чем в свободном пространстве, так как часть мощности разряда уходит в пленку и подложку. Запишем:

$$P_p = P_\phi - P_{nl} - P_{nd}, \quad (1)$$

где  $P_p$  — мощность разряда на участке реального существования факела;  $P_\phi$  — полная мощность факельного разряда;  $P_{nl}$ ,  $P_{nd}$  — мощности, расходуемые соответственно в пленку и подложку.

Для оценки  $P_p$  воспользуемся выражениями из [3], откуда следует, что

$$P_p = P_\phi e^{-\frac{2\sqrt{\omega v}}{\sqrt{5\omega_{Le}r_k} Z_1} \left( 1 - e^{-\frac{2\sqrt{\omega v}}{\sqrt{5\omega_{Le}r_k} \Delta z} \right)}, \quad (2)$$

где  $\omega$  — внешняя частота;  $v$  — частота столкновений заряженных частиц с нейтралами в зоне канала факела;  $\omega_{Le}$  — ленгмюровская частота электронов при соответствующей плотности заряженных частиц в канале;  $r_k$  — радиус канала;  $Z_1$  — любое фиксированное значение  $Z$ ;  $\Delta z$  — изменение  $Z$  в сторону распространения разряда.

Для определения  $r_k$  воспользуемся формулами из [4]:

$$r_k = \frac{4}{E} \sqrt{\frac{2\lambda_\phi}{a\sigma}}, \quad (3)$$

$$\text{где } E = \frac{8\pi\lambda_\phi}{aI_k}. \quad (4)$$

Здесь  $\lambda_\phi$  — теплопроводность канала факела;  $a$  — коэффициент из представления электропроводности  $\sigma$  в виде  $be^{aT_z}$ , где  $T_z$  — температура на оси канала в точке  $z$ ;  $I_k$  — полный ток в канале.

Величину  $I_k$  можно определить из выражений, записанных в [3]. Так как

$$P_p = \frac{2\sqrt{10}}{r_k} \sqrt{\frac{v}{\omega\omega_{Le}}} I_k^2, \quad (5)$$

$$\text{то } I_k = \sqrt{\frac{r_k P_\phi}{2} \sqrt{\frac{\omega\omega_{Le}}{10v}}}.$$

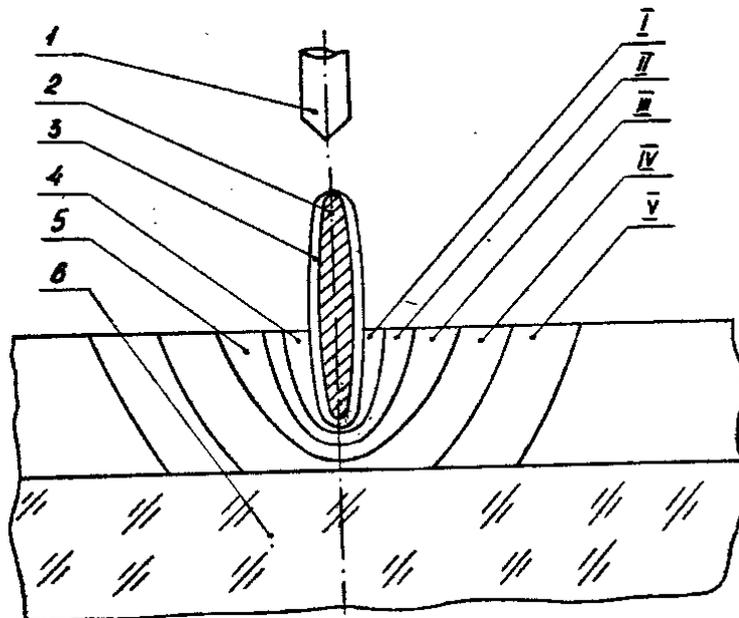


Рис. 1. Схема взаимодействия факельного разряда с толстой резистивной пленкой: 1—электрод; 2—канал факела; 3—оболочка факела; 4—кратер; 5—пленка; 6—подложка; I—V—участки резистивной пленки в зоне взаимодействия

Найдем  $r_k$  из (3) с учётом (4) и (5):

$$r_k = \frac{aP_\phi}{4\pi^2 b \lambda_\phi} \sqrt{\frac{\omega \omega_{Le}}{10\nu}} e^{-aT_\phi}, \quad (6)$$

где  $T_\phi$  — начальная температура факела.

При бесконтактном воздействии ВЧФР на толстую резистивную пленку примем  $\Delta z = l + h$ , где  $l$  — величина зазора между острием электрода и поверхностью пленки, а  $h$  — толщина пленки. Очевидно, что в нашем случае  $z_l = 0$ .

Пусть за время воздействия  $t$  испаряется участок площадью  $S_u$  с массой  $m_u$ , тогда энергия, переданная пленке:

$$Q_{nl} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (7)$$

где  $Q_1$  — количество теплоты, расходуемое на испарение вещества пленки массой  $m_u$ ;  $Q_2$  — часть  $Q_{nl}$ , идущая на нагрев в зонах I, II, III от температуры плавления  $T_n$  до температуры испарения  $T_u$ ;  $Q_3$  — часть  $Q_{nl}$ , идущая на плавление материала резистивной пленки в зонах с I по IV;  $Q_4$  — количество теплоты, расходуемое на нагрев в зонах с I по IV от температуры внешней среды  $T_0$  до точки плавления;  $Q_5$  — часть  $Q_{nl}$ , идущая на нагрев пленки в периферийной области  $V$ .

Запишем:

$$Q_1 = L_u m_u, \quad (8)$$

где  $L_u$  — удельная теплота испарения резистивного материала.

Очевидно, что

$$Q_2 = C_{nR} m_u (T_u - T_n) + C_{nR} k_{ln} m_{nn} (T_u - T_n), \quad (9)$$

где  $C_{nR}$  — удельная теплоемкость расплава;  $m_{nn}$  — масса части жидкой фазы материала пленки, находящейся в состоянии нагрева до температуры испарения;  $k_{ln}$  — коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева участка с  $m_{nn}$  от  $T_n$  до  $T_u$ .

Аналогично имеем:

$$Q_3 = L_n (m_u + m_{nn} + k_{ln} m_n), \quad (10)$$

$$Q_4 = C_R (T_n - T_0) (m_u + m_{nn} + m_n), \quad (11)$$

где  $L_n$  — удельная теплота плавления материала резистивной пленки;  $m_n$  — масса участка пленки, находящегося в расплавленном состоянии;  $k_{ln}$  — коэффициент, учитывающий неравномерность расплава участка;  $C_R$  — удельная теплоемкость материала резистивной пленки.

Найдем  $P_5$ , соответствующую  $Q_5$ :

$$P_5 = C_R \rho_R \int_V (T_i - T_0) dV,$$

где  $\rho_R$  — плотность материала резистивной пленки.

Для нахождения  $P_5$  система кратер (локальная область взаимодействия ВЧФР с пленкой) — нагретая зона пленки рассматривается как система нагретое тело цилиндрической формы — полуограниченный массив.

Окончательное выражение для  $P_5$  имеет вид:

$$P_5 = \frac{2\pi h T_0 [C_R \rho_R (R_n - R_u)]^2 \ln \frac{4h}{R_u + R_n}}{\lambda_R - C_R \rho_R (R_n - R_u) \ln \frac{4h}{R_u + R_n}}, \quad (12)$$

где  $\lambda_R$  — теплопроводность резистивного материала;  $R_n, R_u, R_u$  — внешние радиусы соответственно V, IV, II зон.

Для нахождения  $P_{nd}$  воспользуемся результатами [5] и [6], где теплоотвод в подложку учитывался посредством введения некоторого амплитудного температурного коэффициента  $G$ , равного отношению температуры на границе системы пленка—подложка  $T_2$  к температуре адиабатически изолированной пленки  $T_1$ :

$$G = \frac{T_2}{T_1}.$$

Для нашего случая очевидно, что  $T_2 = T_u$ , а  $T_1$  равна температуре на оси канала факела в свободном пространстве в точке  $A$  с  $z = l + h$ .

Из (5) имеем:

$$G = \frac{1}{g^2 t} \left( e^{gt^2} \operatorname{erfc}(gt) + \frac{2g\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} - 1 \right), \quad (13)$$

$$\text{где } g = \frac{\sqrt{\lambda_2 \tau C_2 \rho_2}}{\rho_R C_R h}.$$

Здесь  $\tau$  — длительность воздействующих импульсов,  $C_2, \rho_2, \lambda_2$  — соответствующие физические коэффициенты по материалу подложки.

Мощность, уходящую в подложку, можно определить по формуле (4):

$$P_{nd} = 8\pi 10^6 E_A^{-1} \sqrt{\frac{\lambda_\phi^3}{\omega a^3}}, \quad (14)$$

где  $E_A$  — напряженность поля в точке  $A$ .

Для точки  $A$  в нашем случае уравнение теплового баланса для взаимодействующей системы согласно [4] имеет вид:

$$\operatorname{div}(\lambda_\phi \operatorname{grad} T_z) = \sigma E_A^{-1} - P_\kappa - P_{nl}, \quad (15)$$

где  $P_\kappa$  учитывает свободную конвекцию вдоль оси разряда и её радиальную составляющую на участке  $z \in [0, l]$ . Так как  $P_\kappa$  в (15) играет существенную роль лишь при принудительном продуве, то, пренебрегая  $P_\kappa$ , получим

$$\lambda_\phi T_z'' = b e^{aT_A} E_A^2 - P_{nl}. \quad (16)$$

Для того, чтобы форма канала у границы с подложкой была ближе к идеальной (цилиндрической), необходимо, чтобы изменение  $T_z$  относительно  $T_A$  при  $Z \rightarrow Z_A$  было мало. В этом случае можно принять  $T_z'' = 0$ , тогда из (16) получим

$$E_A = \sqrt{\frac{P_{nl}}{b e^{aT_A}}},$$

и выражение (14) примет вид

$$P_{nd} = 8\pi 10^6 \sqrt{\frac{b e^{aT_A} \lambda_\phi^3}{P_{nl} \omega a^3}}, \quad (17)$$

где  $T_A = \frac{T_u}{G}$ .

В связи с тем, что картина течения процесса взаимодействия в каждый момент времени определяется положением границы испаренной зоны [7], то выразим массы всех областей через  $m_u$  путём введения специальных коэффициентов.

Пусть :

$$m_{nn} = K_{nn} m_u;$$

$$m_n = K_n m_u;$$

$$m_i = K_i m_u.$$

Очевидно, что  $i$  —я зона является источником нагрева  $(i+1)$  зоны, поэтому воспользуемся законами теплопроводности.

Запишем:

$$Q_{ni} = Q_{nn} + Q_{nii};$$

$$Q_{nii} = Q_n + Q_i,$$

где  $Q_{ni}$  — количество теплоты, переданное областью испарения зоне III;  $Q_{nn}$  — часть  $Q_{ni}$ , ушедшая на нагрев и фазовое изменение материала в области III;  $Q_{nii}$  — количество теплоты, переданное зоной III области IV;  $Q_n$  — часть  $Q_{nii}$ , ушедшая на нагрев и плавление

материала в зоне IV;  $Q_i$  — количество теплоты, переданное зоне V.

Радиусы зон можно также выразить через соответствующие  $K_i$  и  $R_u$ .

Не останавливаясь на подробных выводах, запишем лишь окончательные выражения:

$$\hat{E}_{ii} = \frac{\rho_{ii} k_{ii}}{\rho_R R_\delta^2};$$

$$R_{ii} = \sqrt{k_{ii} + R_\delta^2};$$

$$\hat{E}_i = \frac{\rho_i k_i}{\rho_R R_\delta^2};$$

$$R_i = \sqrt{k_i + R_{ii}^2};$$

$$R_i = R_i + k_i,$$

где

$$k_u = \frac{A_1 + \sqrt{A_2^2 + 4\lambda_R T_0 A_2 A_1^{-1}}}{2\rho_R C_R T_0};$$

$$k_n = \frac{2\lambda_n t (T_u - T_n) (k_{nn} + R_u^2)}{\rho_n k_{nn} (L_n k_{1n} + A_3)};$$

$$k_{nn} = \frac{A_5 + \sqrt{A_5^2 - 8R_u^2 \lambda_n t_p \rho_{nn} (T_u - T_n) (k_{1nn} A_4 + A_3 + L_n)}}{\rho_{nn} (k_{1nn} A_4 + A_3 + L_n)};$$

$$A_1 = \ln \frac{4h}{R_u + \sqrt{k_n + k_{nn} + R_u^2}};$$

$$A_2 = \lambda_n (T_u - T_n) (k_{nn} + R_u^2) k_{nn}^{-1};$$

$$A_3 = C_R (T_n - T_0);$$

$$A_4 = C_{nR} (T_u - T_n);$$

$$A_5 = 2t_p \left[ \frac{\lambda_u (T_\phi - T_u) R_u^2}{R_u^2 - r_k^2} - \lambda_n (T_u - T_n) \right].$$

Здесь  $\rho_i$  и  $\lambda_i$  — плотности и теплопроводности при соответствующих температурах.

Выражение (1) с учётом (2), (7)...(12) и (17) после ряда эквивалентных преобразований примет следующий вид:

$$P_\phi e^{\frac{2\sqrt{\omega v}}{\sqrt{5\omega r_k}^{(l+h)}}} = G_1 R_u^2 + G_2 + 8\pi 10^6 \sqrt{\frac{bt \lambda_\phi^3 e^{aT_u G^{-1}}}{\omega a^3 (G_1 R_u^2 + G_2)}}, \quad (18)$$

где

$$G_1 = \frac{\pi h \rho_R}{t} \left[ L_u + A_4 \left( 1 + \frac{k_{1nn} \rho_{nn}}{\rho_R R_u^2} \right) + (L_n + A_3) \left( 1 + \frac{\rho_{nn}}{\rho_R R_u^2} \right) \right] +$$

$$+ \frac{\pi h \rho_R}{t} (L_n k_{1n} + A_3) \sqrt{k_n + k_{nn} + R_u^2};$$

$$G_2 = \frac{2\pi h T_0 (C_R \rho_R k_n)^2 A_1}{\lambda_R + C_R \rho_R k_n A_1},$$

где  $r_k$  определяется по (6),  $G$  по (13), а остальные выражения приведены выше итогового.

Особенность полученного выражения (18) в том, что оно связывает все физические и геометрические параметры системы ВЧФР—пленка—подложка и технологический параметр  $l$ .

Используя полученное выражение, можно найти зависимости различных параметров от всей совокупности параметров взаимодействующей системы.

Так, разрешив (18) относительно  $l$ , можно найти зависимость величины зазора  $l$  от  $R_u$  или  $P_\phi$  при фиксированных значениях остальных параметров, что представляет большой интерес при исследовании вопроса подгонки толстоплёночных резистивных элементов высокочастотным факельным разрядом бесконтактным методом.

#### Библиографический список

1. Чернобровкин, Д. И. Прибор для подгонки тонкоплёночных элементов микросхем [Текст] / Д. И. Чернобровкин, Н. Д. Мишанин, М. Н. Пиганов и др. // Приборы и системы управления.- 1978.- №6.- С. 45—46.
2. Пиганов, М. Н. Подгонка сопротивления толстоплёночных резисторов методом факельного разряда [Текст] / М. Н. Пиганов, А. В. Волков // Техника средств связи. Сер.

«Технология производства и оборудование».- 1985. № 2.- С. 29—35.

3. Качанов А. В. Электродинамическое описание высокочастотного разряда [Текст] / А. В. Качанов, Е. С. Трехов, Е. П. Фетисов // Физика газоразрядной плазмы. —М.: Атомиздат, 1968. Вып. I. С. 39—47.

4. Трехов Е. С. К теории высокочастотного факельного разряда в воздухе [Текст] / Е. С. Трехов, Е. А. Тюрин, Е. П. Фетисов // Физика газоразрядной плазмы. — М.: Атомиздат, 1969. Вып. 2. С. 148—155.

5. Вейко В. П. К расчету термических искажений рисунка при лазерной обработке тонких пленок [Текст] / В. П. Вейко // Физика и химия обработки материалов.- 1980. № 5. С. 37—43.

6. Либенсон М. Н. О термических искажениях рисунка при обработке пленок воздействием ОКГ [Текст] / М. Н. Либенсон, М. Н. Никитин // Физика и химия обработки материалов.- 1970.- №5.- С. 9—13.

7. Анисимов, С. И. Действие излучений большой мощности на металлы [Текст] / С. И. Анисимов, Я. А. Имас, Г. С. Романов, Ю. В. Ходыко. — М.: Наука, 1970. — 272с.

## MATHEMATICAL MODELING OF INTERACTION A HIGH-FREQUENCY TORCH DISCHARGE WITH CONSTRUCTION ELEMENTS OF RADIO EQUIPMENT

© 2011 A. V. Kostin, M. H. Piganov, A. V. Stolbikov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

In this article spent mathematical modeling of interaction a high-frequency torch discharge with design elements of radio equipment type «a thick resistive film». Researchers have explored interaction of torch discharge with film structures. Mathematical expression, which relates all physical and geometrical parameters of system "discharge-film-substrate" and technological parameter, is gained.

*Modeling, torch discharge, design element of radio equipment, interaction, mathematical model.*

#### Информация об авторах

**Костин Алексей Владимирович**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [xpehbam27@yandex.ru](mailto:xpehbam27@yandex.ru). Область научных интересов: повышение устойчивости бортовой аппаратуры космических аппаратов к внешним воздействующим факторам.

**Пиганов Михаил Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [piganov@ssau.ru](mailto:piganov@ssau.ru). Область научных интересов: надёжность и качество радиоэлектронных средств.

**Столбиков Александр Владимирович**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: точность тонкоплёночных микросборок.

**Kostin Aleksei Vladimirovich**, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [xpehbam27@yandex.ru](mailto:xpehbam27@yandex.ru). Research interests: increasing the stability of the onboard equipment of spacecraft to external factors.

**Piganov Mikhail Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor, head of design and production of radio-electronic means, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [piganov@ssau.ru](mailto:piganov@ssau.ru). Research interests: quality and reliability of radio electronic equipment.

**Stolbikov Aleksandr Vladimirovich**, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: the accuracy of thin-film micro.

## МУЛЬТИСЕНСОРНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ

© 2011 Г. И. Леонович<sup>1</sup>, С. А. Матюнин<sup>1</sup>, Н. А. Ливочкина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup>ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ «Прогресс»

Совершенствование бортовых систем управления направлено на расширение функциональных возможностей при уменьшении массогабаритных показателей, увеличении надежности и снижении энергопотребления. Применение датчиков давления на основе планарного световода с кондукционным покрытием позволяет создать компактную многоточечную сенсорную сеть для сбора и последующей обработки данных о контролируемых параметрах с использованием ограниченного числа волоконно-оптических каналов передачи данных.

*Оптический волновод, кондукционное покрытие, преобразователь давления, сбор и обработка данных.*

Наряду с требованиями к точности, стабильности и массогабаритным параметрам преобразователей давления на первый план выходит возможность создания сетевых структур и поддержания заданной надежности путём резервирования чувствительных элементов и каналов передачи данных к устройству сбора и обработки информации (УСОИ). Кроме того, УСОИ в различных вариантах соединения с группой первичных преобразователей (ПП) может выполнять функции вторичного преобразователя (ВП): оцифровки аналогового сигнала, оценки достоверности данных и исправности ПП, реконфигурации конкретного измерительного канала и др. [1 -3].

Одним из перспективных направлений в создании мультисенсорных преобразователей физических величин является использование волоконно-оптических технологий. В качестве примера можно привести измерительные комплексы FISO Technologies (Канада), Blue Road Research (США), Oregon Department of Transportation (США), SOFO (Japan), «Дозор» и «Электроника-2000А» (РФ) и др.

На рис. 1 представлен вариант классификации волоконно-оптических преобразователей давления (ВОПД). Информативным параметром может быть амплитуда, фаза, частота и поляризация оптического излучения. В соответствии с ролью оптического во-

локна (ОВ) можно выделить две категории ВОПД, в которых ОВ служит чувствительным элементом и в которых используется в качестве оптического тракта для соединения элементов датчика. Возможность применения источников некогерентного излучения и устройств обработки оптических сигналов существенно снижает конструктивную сложность ПП и, соответственно, стоимость ВОПД в целом. Немаловажный фактор, определяющий надежность ВОПД, заключается в возможности применения ПП с закрытым оптическим каналом.

Существенную нишу начинают занимать некогерентные многоточечные преобразователи с закрытым оптическим каналом, основанные на оценке задержки импульсов в ПП, встроенных в волоконно-оптическую сеть. Основной причиной изменения оптического пути, т. е. задержки сигнала и связанного с ней изменения частоты рециркуляции импульсов, являются изменение коэффициента преломления и изменение геометрических параметров сенсорного участка ОВ вследствие воздействия измеряемого параметра на волокно или нанесенное на него кондуктирующее покрытие [4].

В качестве задач, решение которых позволит повысить конкурентоспособность таких преобразователей, необходимо выделить миниатюризацию ПП и обеспечение эффективной сетевой инфраструктуры.



Рис. 1. Классификация ВОПД

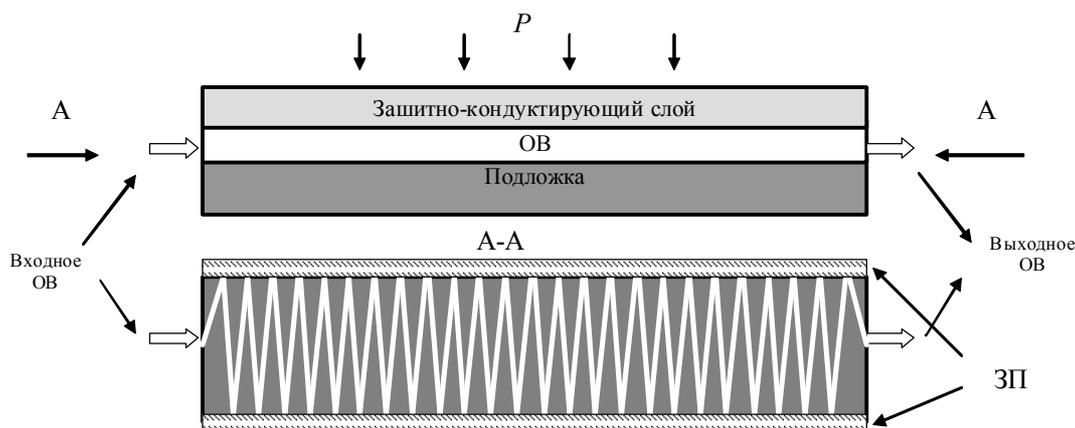


Рис. 2. Упрощенная структурная схема чувствительного элемента

В работах [5, 6] описан принцип построения ПП давления, основанный на кондуктирующем эффекте защитного слоя толщиной 10...1000 нм, дающего 5...40 – кратное увеличение динамического диапазона и чувствительности. В качестве материала слоя может, например, использоваться алифатический полиуретан со сферическими наночастицами двуокиси кремния [7]. Вариант реализации миниатюрного ПП (чувствительного элемента - сенсора), построенного по планарной технологии, показан на рис. 2.

Чувствительный элемент (ЧЭ) представляет собой набор отрезков плоских ОВ с

общей длиной  $L$ , сигнал по которым распространяется посредством отражения от боковых зеркальных покрытий (ЗП). Давление на ОВ передается через защитно-редуцирующий слой (ЗРС). Количество отрезков  $N_L$  фиксированной длины  $L_{fx}$  определяется коэффициентом редукции ЗРС и параметрами измеряемого давления.

В первом приближении можно считать, что связь покрытия и ОВ идеальна (отсутствует проскальзывание слоёв). Тогда модуль Юнга и коэффициент Пуассона для такого композитного материала определяются как [8]

$$E = \frac{E_g \cdot E_n \cdot (V_g \cdot E_g + V_n \cdot E_n)}{(V_g \cdot E_g + V_n \cdot E_n) \cdot (V_g \cdot E_g + V_n \cdot E_g) - V_g \cdot V_n \cdot (V_n \cdot E_g - V_g \cdot E_n)^2}; \quad (1)$$

$$v' = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} = v_g \cdot V_g + v_n \cdot V_n, \quad (2)$$

где  $V_n = S_n / (S_n + S_g) = 1 - V_g$ ,  $E_g$  и  $E_n$  - модули Юнга волокна и покрытия,  $V_g$  и  $V_n$  - коэффициенты Пуассона волокна и покрытия соответственно;  $\varepsilon_{ij}$  - осевые деформации.

Отсутствие деформаций сдвига, изменение коэффициента преломления при изменении давления на величину  $\Delta P$  можно определить как

$$\Delta n = -\frac{n^3}{2 \cdot E} \cdot [p_{13} - v \cdot (p_{11} + p_{12})] \cdot \Delta P, \quad (3)$$

где  $p_{ij}$  - упругооптические константы (коэффициенты Поггеля).

Задержка сигнала при воздействии давления определяется по формуле

$$\Delta t = \frac{L \cdot \Delta n}{c}, \quad (4)$$

где  $c$  - скорость распространения импульса.

С учетом перечисленных факторов связь между относительным изменением давления  $\delta P$  и соответствующим ему изменением параметров ОВ можно записать как

$$\begin{aligned} \delta P &\approx \frac{[n(P) - n_0] \alpha L_0^p}{\left\{ 1 - \left[ \left( 1 - \frac{n^2(P)}{2} \cdot (p_{12} - v(p_{11} + p_{12})) \right) \cdot \alpha + \frac{P}{n(P)} \cdot \frac{dn}{dP} \right] \right\} n_0 L_0^p} = \\ &= \frac{\delta n(P) \cdot \alpha}{1 - \left[ \left( 1 - \frac{n^2(P)}{2} \cdot (p_{12} - v(p_{11} + p_{12})) \right) \cdot \alpha + \frac{P}{n(P)} \cdot \frac{dn}{dP} \right]}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $L_0^p$  - длина части ОВ, подвергающейся и изменяющейся при воздействии давления;  $n(P)$  - показатель преломления сердцевинки ОВ при изменении давления;  $n_0$  - исходное значение коэффициента преломления, привязанное к реперной точке  $P=P_0$ ;  $\alpha$  - коэффициент линейного расширения материала ОВ под воздействием давления;  $p_{11} = 0,121$  и  $p_{12} = 0,27$  - коэффициенты Поггеля для кварцевого ОВ.

В результате механического взаимодействия полимерного защитного слоя и волновода чувствительность сенсора, т. е. крутизна характеристик  $L^p(P)$  и  $n(P)$ , может

увеличиться на порядок и более в зависимости от материала и толщины пленки [5, 8].

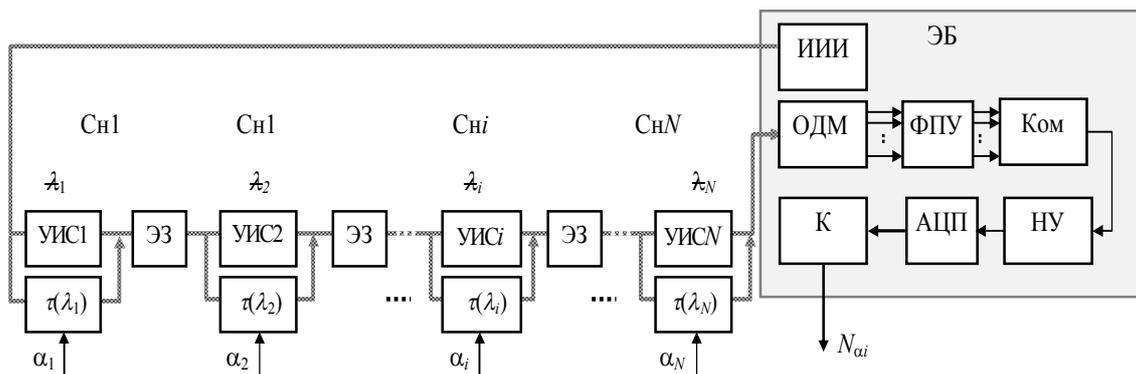
Применение оптического волокна для передачи сигналов изначально предполагает функциональное резервирование одиночного оптоволоконного канала для последовательного соединения сенсоров, функционирующих в различных участках спектра светового потока осветителя. Это означает, что в спектре имеется ряд поддиапазонов, формируемых узкополосными светофильтрами (УС), которые могут использоваться для снятия информации параллельно от группы сенсоров.

С целью повышения помехоустойчивости мультисенсорного ВОПД, связанной с обеспечением инвариантности к дрейфу спектральных характеристик УС при воздействии внешних дестабилизирующих факторов, можно применить спектрально-временное разделение каналов (рис. 3) [9].

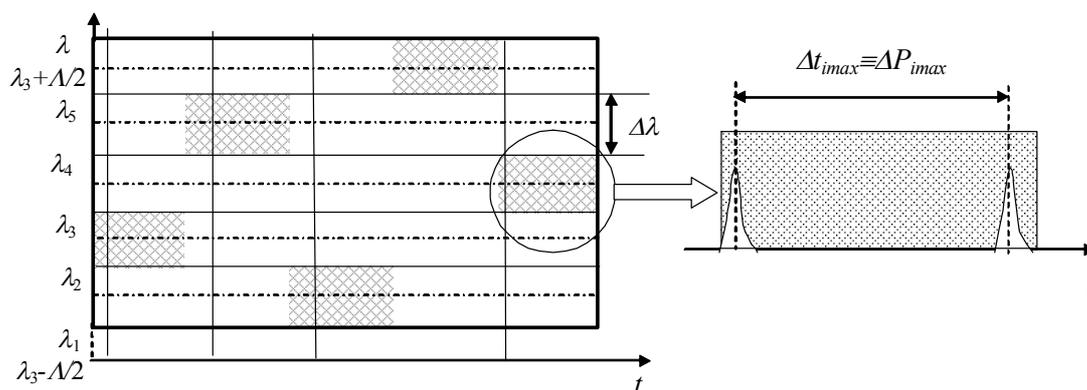
Световой поток от импульсного источника излучения ИИИ поступает в волоконно-оптическую линию, соединяющую группу сенсоров. Каждому сенсору посредством УС и элементов задержки (ЭЗ) выделяются спектральная полоса и временные ворота для измерения давления, позволяющие исключить ошибки идентификации сенсоров при возможном наложении спектров от смежных сигналов путём подбора алгоритма распределения спектрально-временных чипов (рис. 3,б). Посредством оптического демультиплексора ОДМ, фотоприёмного устройства ФПУ, коммутатора К, нормирующего усилителя НУ и АЦП принятые оптические сигналы разделяются по спектру, преобразуются в каналные электрические сигналы, из которых формируются цифровые коды, пропорциональные давлению в соответствующих точках. Дальнейшая обработка кодов и формирование пакета данных осуществляется контроллером К.

Количество и порядок подключения к ВП сенсоров и выравнивающих ЭЗ определяется рядом факторов, среди которых выделяются:

- количество и топологическая схема размещения точек измерения давления;



а)



б)

Рис. 3. Мультисенсорный ВОПД со спектрально-временным разделением каналов и последовательным вводом и выводом излучения по одиночному ОВ:

а) структурная схема; б) спектрально-временная плоскость группового сигнала

- диапазон измерения давления различными сенсорами;
- коэффициент затухания в ОВ;
- удаленность ВП от сенсоров;
- требуемые информационная емкость и быстродействие МВОПД;
- применяемые алгоритмы коррекции погрешности ФПП каждого сенсора;
- кратность резервирования сенсоров;
- требования к надежности, массогабаритным показателям и стоимости преобразователя в целом.

#### Библиографический список

1. Прогноз развития датчиков. Отчет исследования ожидаемого развития датчиков до 2015 г. / Дания. Центр сенсорной технологии // Датчики и системы.- 2003.- №11. – С. 59-62.

2. [www.transense.co.uk/downloads/articles](http://www.transense.co.uk/downloads/articles)

3. Majeed, Y., Al-Bassiyouni, M., Dasgupta, A., “Design Optimization of Fiber Optic Sensors”, Optical Society of America, 2009.

4. Леонович Г. И. Спектральное и спектрально-модовое кодирование сигналов в оптоэлектронных преобразователях перемещения с волоконно-оптическими каналами передачи информации [Текст] / Г. И. Леонович, С. А. Матюнин, П. Л. Токман, Э. С. Луганский // Известия Самарского научного центра РАН.- 2007.- т.9. №3. – С. 739 – 748.

5. Vohra S. T., Dandridge A., Chang C. C., Johnson G. A., Tveten A. B, Nau G. M. High Sensitivity Pressure Sensors Utilizing Advanced Polymer Coatings / U. S. Naval Research Laboratory, Code 5670 Washington, DC 20375, 1999.

6. Vohra, S. T. Coated fiber pressure sensors utilizing pressure release coating material / Patent № US 6.611.633 B1, 2003.

7. Гофман, И. В. и др. Наноконпозиции алифатического полиуретана с двуокисью кремния, полученные методом совместного синтеза: морфология и механические характеристики [Текст] / И. В. Гофман // Физика твердого тела.- 2010.- Т.52, вып. 3.- С. 79-9.

8. Най, Дж. Физические свойства кристаллов [Текст] / Дж. Най. – М.: Мир, 1967. – 385 с.

9. Леонович Г. И. Мультисенсорные волоконно-оптические преобразователи транспортных систем [Текст] / Г. И. Леонович, В. М. Гречишников, А. С. Лукин, Н. А. Ливочкина // Известия Самарского научного центра РАН. Специальный выпуск «Перспективы и направления развития транспортной системы». - 2007.- С. 125-130.

## THE FIBER-OPTICAL MULTITOUCH PRESSURE TRANSDUCER

© 2011 G. I. Leonovich<sup>1</sup>, S. A. Matjunin<sup>1</sup>, N. A. Livochkina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

<sup>2</sup> SRPSRC “TsSKB-Progress”

Improving on-board control systems aimed at expanding the functional capabilities while reducing the weight and size parameters, increasing reliability and reducing power consumption. The use of pressure sensors based on planar waveguide coated with conduction allows you to create a compact multi-point sensor network to collect and post-processing on the monitored parameters using a limited number fiber-optical data links.

*Optical waveguide, pressure transducer, conduction coverage, data acquisition and processing.*

### Информация об авторах

**Леонович Георгий Иванович**, профессор кафедры радиотехнических устройств, доктор технических наук, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [leogil@mail.ru](mailto:leogil@mail.ru). Область научных интересов: оптоэлектроника, информационно-измерительные системы.

**Матюнин Сергей Александрович**, заведующий кафедрой электронных систем и устройств, доктор технических наук, профессор, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: системы управления, информационно-измерительные устройства и системы.

**Ливочкина Наталья Александровна**, инженер ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ «Прогресс». Область научных интересов: теплотехнические измерения.

**Leonovich Georgiy Ivanovich**, professor of radio devices department, Dr. sci. tech., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [leogil@mail.ru](mailto:leogil@mail.ru). Area of scientific interests: optoelectronics, information-measuring device and systems.

**Matjunin Sergey Aleksandrovich**, the professor managing of electronic systems and devices department, Dr. sci. tech., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). Area of scientific interests: control systems, information-measuring device and systems.

**Livochkina Natalia Aleksandrovna**, engineer “CCA-Progress”. Area of scientific interests: firing measurement.

УДК 621.382.049.77

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ТЕРМОСТАБИЛЬНЫХ РЕЗИСТИВНО-ЕМКОСТНЫХ СТРУКТУР**

© 2011 А. И. Меркулов, П. В. Лактанов, В. А. Меркулов

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

С использованием математических методов планирования экстремальных экспериментов получена регрессионная модель второго порядка техпроцесса изготовления тонкоплёночных резистивно-ёмкостных структур. Определены технологические параметры, при которых температурный коэффициент постоянной времени структуры будет равен нулю.

*Математическая модель, резистивно-ёмкостные структуры, априорное ранжирование, симплекс-метод, факторный эксперимент.*

В связи с трудностью создания малогабаритных индуктивных элементов для схем, работающих на низких частотах, внимание исследователей всё больше привлекают частотно-избирательные схемы на основе RC-элементов, в частности, на основе тонкоплёночных RC-структур с распределёнными параметрами.

Резистивно-ёмкостные элементы с распределёнными параметрами представляют собой системы чередующихся слоев (полосок) материалов, в которых проводящие и/или резистивные слои разделены диэлектрическими слоями (или двойными заряженными слоями с электронной или ионной проводимостью) [1]. К частотно-избирательным схемам предъявляется требование высокой стабильности при работе в диапазоне температур. Отклонение частоты RC-фильтров от номинальной при изменении температуры окружающей среды зависит от соответствующих изменений величины сопротивления и ёмкости RC-структуры, которые, в свою очередь, зависят от множества технологических факторов, действующих в процессе изготовления RC-структуры.

В основу изучения стабильности RC-структур следует положить изучение их температурных характеристик, которые определяются свойствами тонких плёнок, напыляемых при изготовлении RC-структур. Такими характеристиками могут быть температурный коэффициент сопротивления  $\alpha_R$  – для резисторов и температурный коэффициент ёмкости  $\alpha_C$  –

для ёмкостей RC-структур. Естественным является стремление изготавливать RC – структуры таким образом, чтобы их  $\alpha_R$  и  $\alpha_C$ , а следовательно и  $\alpha_{RC}$  (температурный коэффициент постоянной времени), были равны нулю. Ниже приведены результаты исследований, позволяющие выбирать режимы техпроцесса, на основе которых можно получить термостабильные RC-структуры и частотно-избирательные схемы.

С целью получения адекватной математической модели техпроцесса изготовления RC-структур применены методы планирования экстремальных экспериментов. В качестве функции цели, иначе – критерия оптимизации, выбрано нулевое значение  $\alpha_{RC}$ . В качестве независимых переменных на основании изучения литературных данных и опроса специалистов выбираем следующие показатели (табл. 1). В таблице указаны также уровни варьирования показателей. Для априорного ранжирования факторов с целью выделения наиболее существенных из них проведён опрос специалистов. Степень согласованности мнений всех исследователей оценивался с помощью коэффициента конкордации  $W$ , величина которого равна 0,74. Можно считать, что между мнениями исследователей имеется существенная связь. На рис.1 представлен результат ранжирования независимых переменных (факторов).

При проведении отсеивающих экспериментов методом случайного баланса выделены

три фактора, которые учитывались в дальнейшей работе:  $x_5$  – скорость испарения материала диэлектрика ( $V_{SiO}$ );  $x_2$  – скорость испарения резистивного материала ( $V_{Cr}$ );  $x_3$  – толщина пленки хрома ( $\Delta Cr$ ). Остальные факторы были зафиксированы на определенных уровнях: степень вакуума определялась возможностью вакуумной установки –  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст., толщина пленки диэлектрика и скорость испарения материала обкладки RC-структуры в дальнейшем поддерживались на постоянном уровне: 4000 Å/с и 20 Å/с соответственно.

Нахождение области оптимума осуществлялось с помощью факторного анализа. Для получения уравнения регрессии был поставлен полный факторный эксперимент типа  $2^3$ . Гипотеза об адекватности представления результатов исследования полиномом первой степени проверялась с помощью критерия Фишера. Так как табличное значение  $F$ -критерия оказалось меньше опытного ( $F_{0,05}=2,37$ ), гипотезу об аде-

кватности линейного приближения нельзя считать верной. Поэтому в дальнейшем осуществлялась аппроксимация рассматриваемой поверхности отклика полиномом второй степени. Для нахождения области оптимума использовался один из рациональных методов поиска экстремума функции нескольких переменных – симплекс-планирование.

Результаты, полученные на основе симплекс-планирования, проверялись с помощью метода крутого восхождения. Определено, что оптимальным является такой режим напыления тонкопленочных RC-структур с распределенными параметрами, при котором толщина резистивной плёнки имеет значения 250...300 Å, скорость испарения  $SiO$  – 8...9 Å/с., скорость испарения  $Cr$  – 8...9 Å/с.

Для описания поверхности отклика уравнением второго порядка независимые переменные варьировались на трёх уровнях.

Таблица 1. Факторы технологического процесса

Независимые переменные	-1	+1
$X_1$ - степень вакуума при испарении хрома, мм рт. ст.	$10^{-4}$	$10^{-5}$
$X_2$ - скорость напыления хрома, Å/с	3	10
$X_3$ - толщина пленки хрома, Å	200	400
$X_4$ - степень вакуума при испарении SiO, мм рт. ст.	$10^{-4}$	$10^{-5}$
$X_5$ - скорость нанесения SiO, Å/с	5	20
$X_6$ - толщина пленки SiO, Å	2000	3000
$X_7$ - скорость нанесения материала верхней обкладки (Al), Å/с	20	30

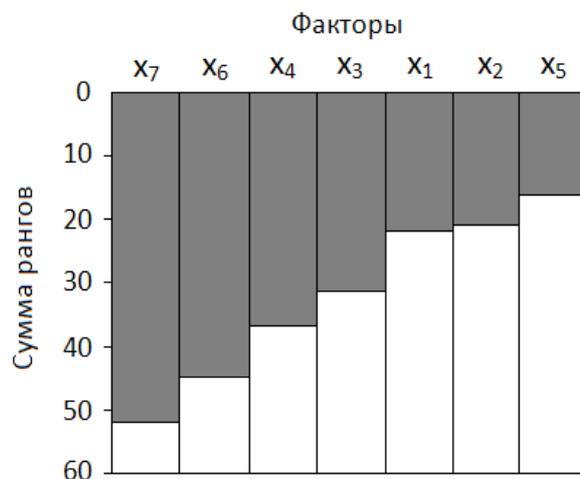


Рис. 1. Средняя априорная диаграмма рангов при изучении зависимости  $\alpha_{RC}$  RC-структуры от условий её изготовления

При описании почти стационарной области наиболее эффективным считается центральное композиционное ротатабельное планирование второго порядка [2]. Планирование является композиционным, т.к. оно основано на достраивании линейной модели (полного факторного эксперимента или дробной реплики) до плана второго порядка. Для этого к «ядру», образованному при движении в область оптимума, добавлялись несколько «звёздных» и «нулевых» точек. Планирование является центральным, т.к. оно симметрично относительно центра.

Расстояние от «нулевой» точки до «звёздной» (величина звёздного плеча) определялось по формуле  $\alpha = 2^{k/4}$ , где  $k$  – число показателей. В нашем случае  $\alpha = 2^{3/4} = 1,682$ .

После расчёта коэффициентов регрессии получено уравнение

$$y = 0,649 + 0,961x_1 + 0,365x_2 + 0,446x_3 - 0,0388x_1x_2 - 0,0113x_1x_3 - 0,0788x_2x_3 + 0,02x_1^2 + 0,005x_2^2 - 0,001x_3^2. \quad (1)$$

Здесь  $y$  – параметр оптимизации ( $\alpha_{RC}$ );  $x_1, x_2, x_3$  – независимые переменные. В связи с тем, что  $F_{0,05} = 5,05$ , гипотезу об адекватности представления уравнения регрессии полиномом второго порядка можно считать верной с 95% достоверностью.

Для облегчения практических расчётов и интерпретации установленных закономерностей уравнение (1) преобразуем с введением именованных величин:

$$\alpha_{RC} \cdot 10^4 \text{ 1/град} = 0,534V_g + 0,641V_p + 0,0291d - 0,0097V_gV_p - 0,000188V_gd - 0,001313V_p d + 0,005V_g^2 + 0,00125V_p^2 - 0,000011d^2 - 14,203, \quad (2)$$

где  $V_g$  – скорость нанесения диэлектрической плёнки;  $V_p$  – скорость нанесения резистивной плёнки;  $d$  – толщина резистивной плёнки.

Для изучения поверхности отклика, соответствующей в области эксперимента уравнению (2), сделаем каноническое преобразование этого уравнения к стандартному виду.

В итоге получаем следующее каноническое уравнение:

$$y - 1,79 = 0,0479x_1^2 - 0,0419x_2^2 + 0,02x_3^2. \quad (3)$$

С учётом классификации поверхностей второго порядка установим вид поверхности отклика. Рассматриваемая поверхность относится к типу минимакса и имеет вид двухполо-

стного гиперboloида (рис. 2) с центром, находящимся вне области эксперимента. Сечения поверхности отклика плоскостями  $X_1S X_2$  и  $X_1S X_3$  могут быть представлены уравнениями гипербол, для которых ось  $X_1$  является действительной осью. Область эксперимента находится в верхней полости гиперboloида, её сечения плоскостями  $X_2S X_3$  являются эллипсами.

Для изучения поверхности отклика в области эксперимента построены некоторые её двумерные сечения с контурными линиями, соответствующими определенным значениям критерия оптимизации (рис. 3).

Рассмотрим сечение  $x_3 = 0$  (для резистивной плёнки толщиной  $300\text{\AA}$ ). Подставляя значение  $x_3 = 0$  в уравнение регрессии, получим  $y = 0,649 + 0,96x_1 + 0,365x_2 - 0,039x_1x_2 + 0,02x_1^2$ . (4)

В каноническом представлении это уравнение имеет вид:

$$y - 19,547 = 0,03276x_2^2 - 0,008156x_1^2. \quad (5)$$

На основании уравнения (5) после подстановки в него различных значений  $\alpha_{RC}$  получаем уравнения соответствующих контурных кривых – гипербол, в совокупности представляющих целое семейство сопряженных гипербол (линий равных значений  $\alpha_{RC}$ ).

Данное двумерное сечение приведено на рис. 4. Из рисунка видно, что минимальное (нулевое) значение  $\alpha_{RC}$  для резистивной плёнки RC - структуры, имевшей толщину  $300\text{\AA}$ , может быть достигнуто при варьировании скорости испарения материала диэлектрика и скорости испарения резистивного материала в следующих пределах:

$$V_{sio} = 1 \dots 9 \text{ \AA/c}; V_{Cr} = 20 \dots 1 \text{ \AA/c}.$$

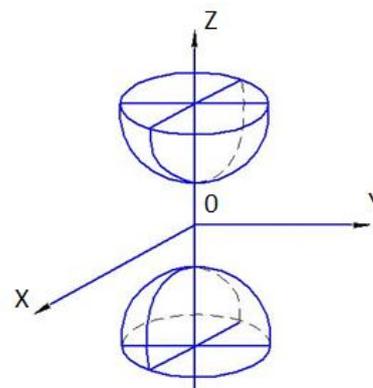


Рис. 2. Двухполостный гиперboloид

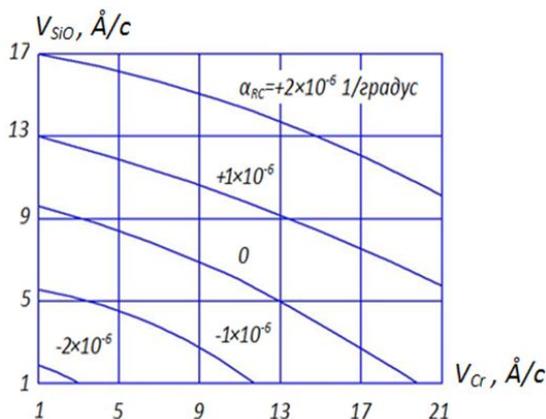


Рис. 3. Двухмерное сечение:  $\Delta Cr = 300 \text{ \AA}$

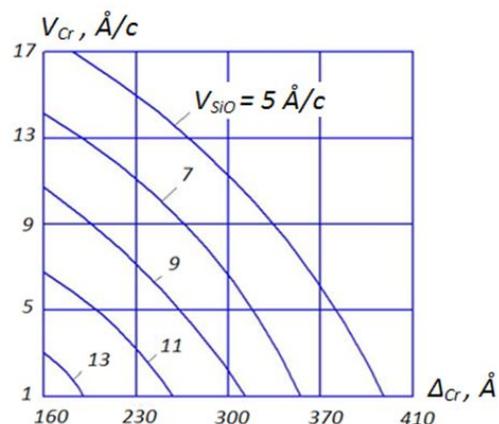


Рис. 4. Сечение поверхности отклика при  $\alpha_{RC} = 0$

Получены также сечения  $x_I = +1; +0,5; 0; -0,5; -1$  для  $\alpha_{RC} = 0$ , позволяющие выбирать необходимые сочетания  $V_{Cr}$  и  $\Delta Cr$  при разных скоростях напыления диэлектрика. Из графиков видно, что возможность получения нулевых значений  $\alpha_{RC}$  уменьшается (в пределах условий эксперимента) с увеличением скорости напыления диэлектрика.

Таким образом, подученная математическая модель позволяет определять рациональные режимы изготовления RC-структур с распределенными параметрами, имеющих как нулевое (оптимальное) значение температурного

коэффициента постоянной времени, так и любое требуемое значение.

#### Библиографический список

1. Гильмутдинов, А. Х. Резистивно-емкостные элементы с распределенными параметрами: анализ, синтез и применение [Текст] / А. Х. Гильмутдинов. - Казань: Казан. гос. техн. ун-т. - 2005. - 151с.
2. Фрактальные элементы и радиосистемы: Физические аспекты. Монография / Под ред. А. А. Потапова. - М.: Радиотехника, 2009. - 200с. Серия «Фракталы. Хаос. Вероятность». Редактор А. А. Потапов).

## MATHEMATICAL MODELING OF TECHNOLOGICAL PRODUCTION PROCESS OF THERMO-STABLE RESISTOR – CAPACITY STRUCTURES

© 2011 A. I. Merkulov, P. V. Laktanov, V. A. Merkulov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

Regression model of the second order of technical processes of the thin-film resistor-capacity structures production with application of mathematical planning methods of extreme experiments has been developed. Technological parameters at which the temperature ratio of constant time structure is equal to zero have been determined.

*Mathematical model, resistor-capacity structures, priori ranging, simplex-method, factor experiment.*

#### Информация об авторах

**Меркулов Анатолий Игнатьевич**, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, к.т.н., Самарский государственный аэрокосмиче-

ский университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail [aimerk@yandex.ru](mailto:aimerk@yandex.ru). Область научных интересов: микроэлектроника.

**Лактанов Павел Владимирович**, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail [pavellaktanov@gmail.com](mailto:pavellaktanov@gmail.com). Область научных интересов: авиация.

**Меркулов Владимир Анатольевич**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), инженер отдела информатизации и телекоммуникаций. E-mail: [mva005@mail.ru](mailto:mva005@mail.ru). Область научных интересов: информационные технологии.

**Merkulov Anatoly Ignatiyevich**, associate professor of designing and production of radio-electronic equipment department, Ph.D., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail [aimerk@yandex.ru](mailto:aimerk@yandex.ru). The field of scientific interests: microelectronics.

**Laktanov Pavel Vladimirovich**, a student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail [pavellaktanov@gmail.com](mailto:pavellaktanov@gmail.com). The field of scientific interests: aviation.

**Merkulov Vladimir Anatoliyevich**, post-graduate students, engineer of information and telecommunication department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail [mva005@mail.ru](mailto:mva005@mail.ru). The field of scientific interests: information techniques.

## ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЛЬНОГО И УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ В ТРАКТЕ УСКОРИТЕЛЯ

© 2011 А. В. Пияков

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Представлены теория, расчётные параметры и детали конструкции измерения радиального и углового распределения частиц в тракте ускорителя. Приведены результаты моделирования мишени, моделирования электрической схемы зарядочувствительного усилителя.

*Ускоритель, микрометеорит, пылевая частица, мишень.*

### Введение

При проектировании ускорителей пылевых частиц возникает задача построения физико-математической модели движения частиц в тракте ускорителя. Все существующие модели либо учитывают лишь осевое движение частиц, либо детерминированное движение частиц с учётом осевой и радиальной составляющих. Однако, как показала практика, данные модели не могут в целом описать вероятность прохождения частиц через тракт ускорителя. Таким образом, возникает задача построения вероятностной модели движения частиц в тракте электродинамического ускорителя. Для проверки такой модели на адекватность необходимо экспериментальное измерение углового и радиального распределения частиц в тракте электродинамического ускорителя.

### Неопределённость траектории частиц в тракте ускорителя

Вследствие качественного изменения траекторий частиц при незначительном изменении (в пределах погрешностей измерения) начальных условий для моделирования предполагается построение  $N$ -траекторий с последующим усреднением результатов. Таким образом, для каждой продольной координаты нахождения частицы в тракте будет выбрана наиболее вероятная радиальная координата. Например, на рис. 1 приведены 3 различные траектории частиц в тракте дина-

мического ускорителя для близких начальных условий.

Начальные отклонения частицы: 1 – 1,0 мм; 2 – 0,999998 мм; 3 – 1,000002 мм; 4 – наиболее вероятная траектория (линия тренда). Скорость частицы на входе 1 км/с, размер частицы 10 мкм. Впервые неопределённость данных математических моделей была описана Эдвардом Норттоном Лоренцем в 1961 году. Такая неопределённость характерна для всех математических моделей, связанных с вычислениями, в которых последующие результаты используют ранее полученные данные в качестве исходных. Математическая модель движения частиц в тракте ускорителя как раз относится к моделям данного вида. Таким образом, становится очевидной необходимость разработки модели движения частиц в тракте ускорителя, где каждому моменту времени ставятся в соответствие вероятности нахождения одной и той же частицы в разных координатах. Логично, что исходными данными для такой модели должно быть распределение частиц по сечению тракта ускорителя на выходе инжектора. Одним из способов регистрации места удара частицы является метод разделения заряда.

### Теоретические исследования устройства измерения радиального и углового распределения частиц в тракте ускорителя

Для осуществления метода разделения заряда предполагается использовать мишень

квадратной формы из резистивного материала (рис.1). Модель мишени приведена на рис. 2.

Для моделирования работы мишени использовался САПР MicroCAP.

Заряженная частица попадает в мишень, сообщая в точку попадания свой заряд, который делится резистивным слоем и уси-

ливается зарядочувствительными усилителями.

Как показало моделирование такой мишени в MicroCAP, амплитуды сигналов на выходах 1 и 2 являются функциями от координат попадания частицы в резистивный слой.

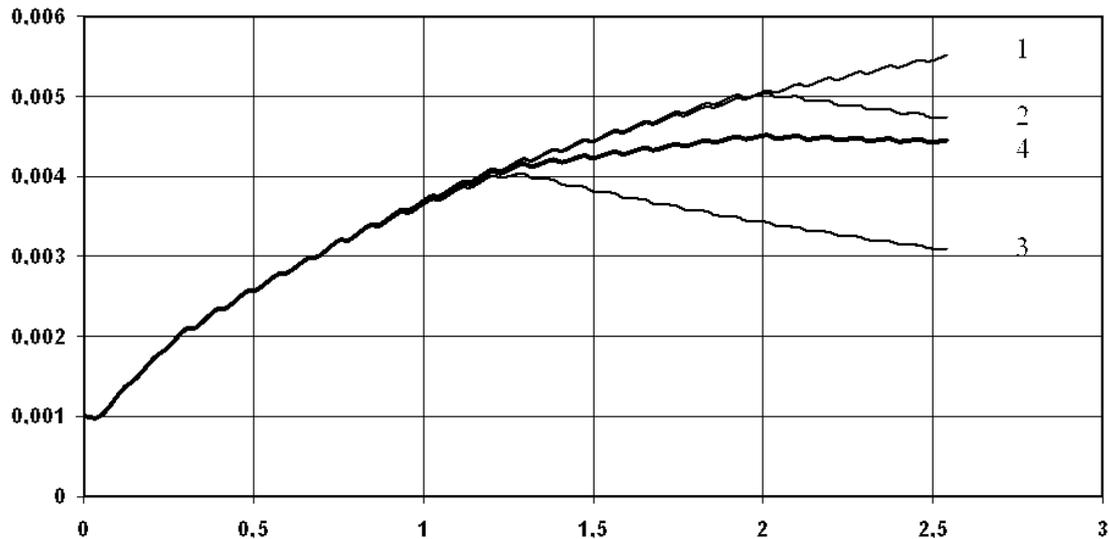


Рис. 1. Траектории частиц в тракте ускорителя

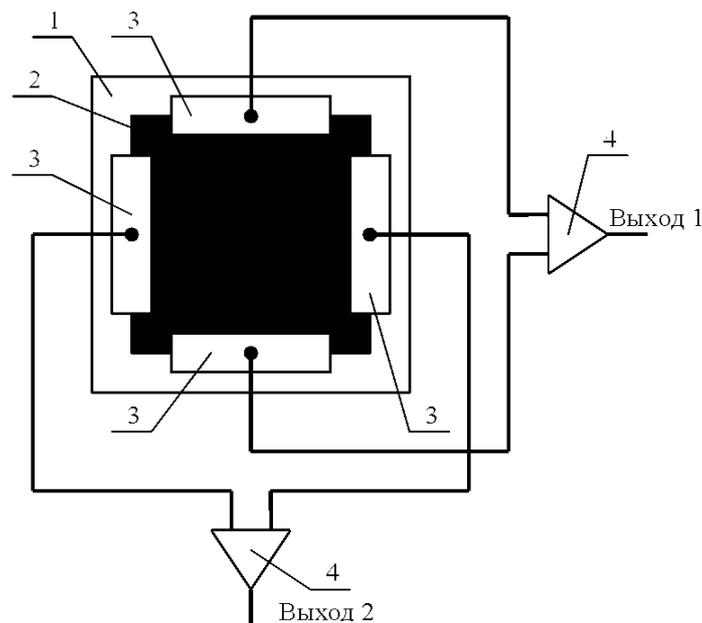


Рис. 2. Структура устройства: 1 — ситалловая подложка; 2 — металлические контактные площадки; 3 — резистивный слой; 4 — зарядочувствительный усилитель

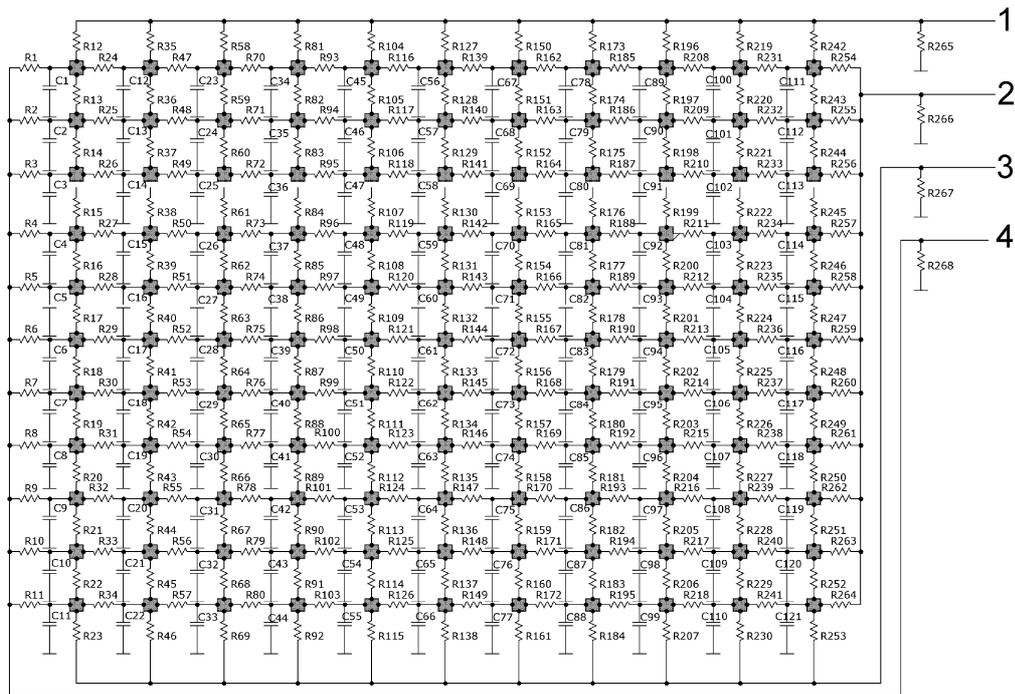


Рис. 3. Модель мишени

Таким образом, зная заряд частицы (его можно определить, установив перед мишенью цилиндр Фарадея; амплитуда сигнала с цилиндра Фарадея пропорциональна заряду частицы), можно определить координату столкновения ее с мишенью, а тем самым получить картину плотности частиц по сечению ускорителя.

Результаты моделирования устройства приведены ниже: на рис. 4 – зависимость выходного импульса от времени для различного

сопротивления резистивного слоя, на рис. 5 – зависимость выходного напряжения от времени для различного места удара.

Как видно из вышеприведенных рисунков, оптимальным является наибольшее сопротивление матрицы – около 2 МОм на квадрат. Сигнал от попадания частицы в различные участки мишени хорошо идентифицируется.

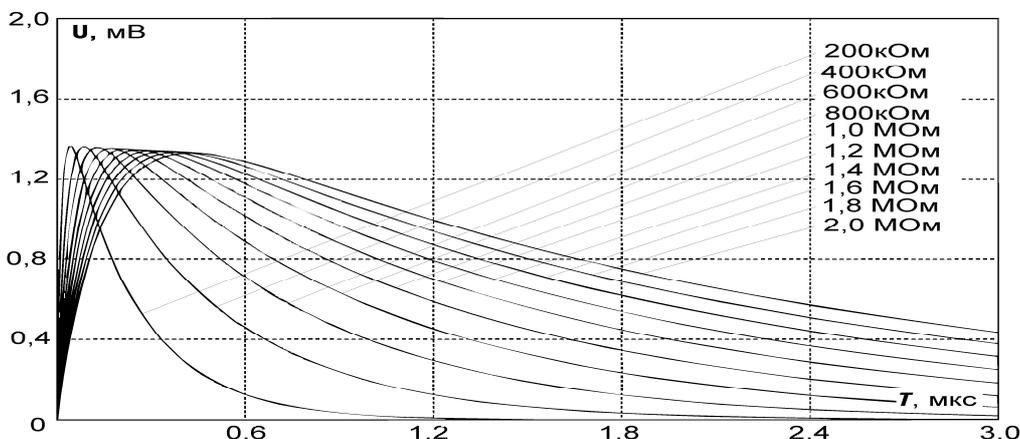


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения от времени для различных сопротивлений мишени

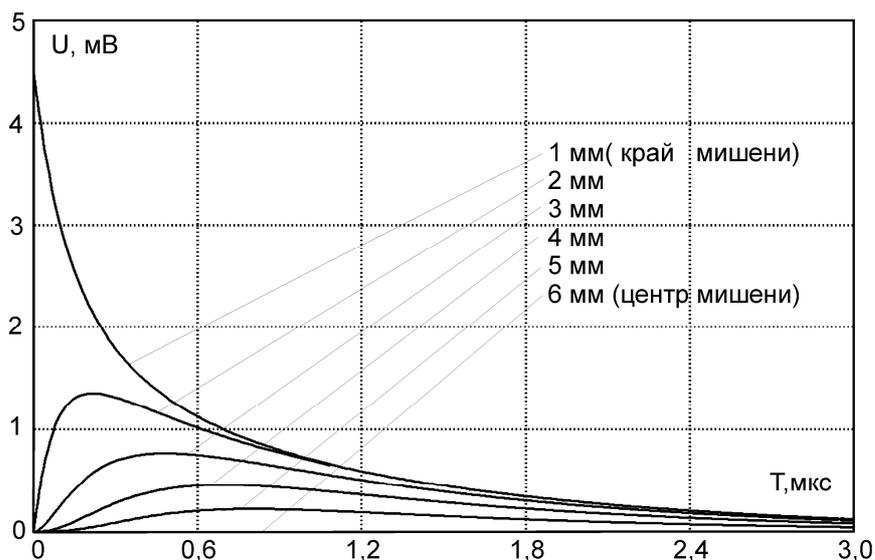


Рис. 5. Зависимость выходного напряжения от различной координаты попадания частицы в мишень

#### Конструкция устройства для измерения углового и радиального распределения частиц в тракте ускорителя

Для проведения экспериментов по измерению углового и радиального распределения частиц в тракте ускорителя было собрано соответствующее устройство, состоящее из мишени и блока усилителей. Для фиксации результатов предполагается использовать осциллографические приставки WELLEMAN PCS-500. Структурная схема устройства приведена на рис. 6.

Мишень была изготовлена из фольгированного стеклотекстолита, а резистивный слой из смеси электротехнического лака с

графитовой пудрой. Фотография мишени приведена на рис. 7.

Усилитель состоит из четырёх усилительных каскадов и фильтра нижних частот. Принципиальная схема усилителя приведена на рис. 8. Схемотехнический анализ будем производить с помощью системы автоматизированного проектирования MICRO-CAP.

Первый каскад составлен из элементов: резисторов  $R1$ ,  $R2$ ; конденсаторов  $C1$ ,  $C2$ ; транзисторов  $VT1$ ,  $VT2$ ,  $VT3$ ,  $VT4$ . Первый каскад собран из четырёх полевых транзисторов  $BF244A$ , включённых по схеме с общим истоком. Транзисторы включены параллельно для улучшения соотношения сигнал-шум. Коэффициент усиления первого каскада 6.

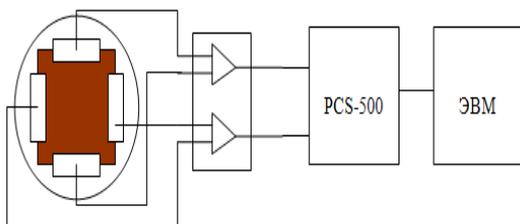


Рис. 6. Структурная схема устройства

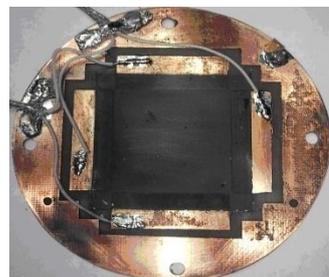


Рис. 7. Фотография мишени

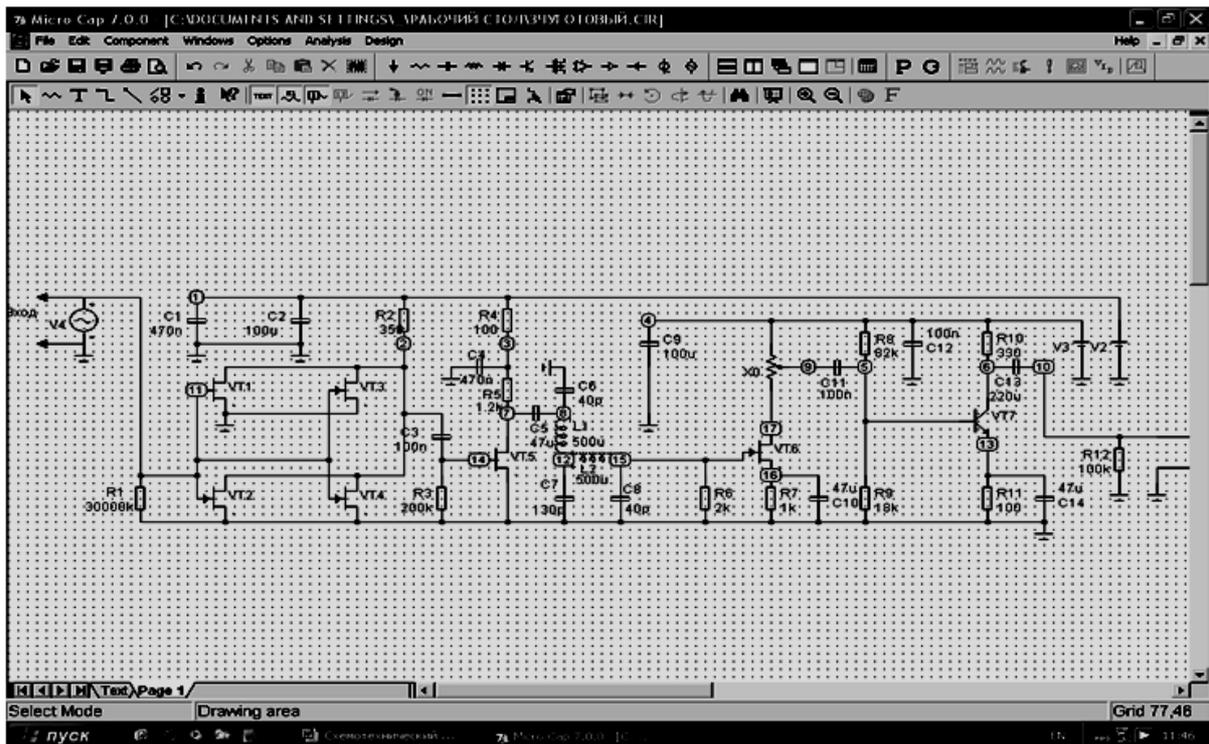


Рис. 8. Электрическая принципиальная схема усилителя

Второй каскад составлен из элементов: резисторов  $R3$ ,  $R4$ ,  $R5$ ; конденсаторов  $C3$ ,  $C4$ ; транзистора  $VT5$ . Каскад собран на полевом транзисторе  $BF244A$  по схеме с общим истоком. Коэффициент усиления второго каскада 3.

Третий каскад составлен из элементов: резисторов  $R6$ ,  $R7$ ; подстроечного резистора  $X0$ ; конденсаторов  $C10$ ,  $C11$ ; транзистора  $VT6$ . Каскад собран на полевом транзисторе  $BF244A$  по схеме с общим истоком. Третий усилительный каскад имеет высокоомный вход, чтобы не исказить сигнал после фильтра. Коэффициент усиления третьего каскада 9. Так как данный каскад имеет наибольший коэффициент усиления, то общий коэффициент усиления усилителя рационально регулировать именно этим каскадом. При этом имеем диапазон варьирования коэффициента усиления. Регулировка реализуется с помощью подстроечного резистора  $X0$ .

Четвертый каскад составлен из элементов: резисторов  $R8$ ,  $R9$ ,  $R10$ ,  $R11$ ,  $R12$ ; конденсаторов  $C11$ ,  $C12$ ,  $C13$ ,  $C14$ ; транзистора

$VT7$ . Каскад собран на биполярном транзисторе  $BC546B$  по схеме с общим эмиттером. Коэффициент усиления четвертого каскада 6. Четвёртый каскад выполняет функции как усилительного, так и согласующего каскада. Данный каскад имеет низкоомный выход, что позволяет подключать к выходу усилителя коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом.

В состав усилителя входит фильтр нижних частот, состоящий из конденсаторов  $C5$ ,  $C6$ ,  $C7$ ,  $C8$ ; катушек индуктивности  $L1$ ,  $L2$ . Фотография блока усилителей приведена на рисунке 9(9,а – со снятой крышкой, 9,б – внешний вид).

Для экранировки усилители располагаются в металлическом корпусе, входы и выходы выполнены с помощью металлизированных разъемов. Питание усилителей для уменьшения помех предполагается от свинцово-кислотной аккумуляторной батареи.

Работа выполнена при поддержке ФЦП “Кадры”. Контракт № П889 от 26 мая 2010 года.



Рис. 9. Блок усилителей

**Библиографический список**

1. Левшина, Е. С. Электрические измерения неэлектрических величин [Текст] / Е.

С. Левшина, П. В. Новицкий.- Энергоатомиздат, 1983.- 256 с.

**MEASUREMENTS OF THE RADIAL AND ANGULAR DISTRIBUTION OF PARTICLES IN THE ACCELERATOR TRACT**

© 2011 A. V. Piyakov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The theory, design parameters and construction details of measurement the radial and angular distribution of particles in the path the accelerator. The results modeling of the target, modeling the electrical circuit charge sensitive amplifier.

*Accelerator, micrometeors, dust particle, the target.*

**Информация об авторе**

**Пияков Алексей Владимирович**, докторант, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, к.т.н., доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [piyakov@ssau.ru](mailto:piyakov@ssau.ru). Область научных интересов: физика ускорителей частиц, космические эксперименты.

**Piyakov Aleksey Vladimirovich**, Ph. D., Department of production and design of radio-electronic devices, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [piyakov@ssau.ru](mailto:piyakov@ssau.ru). Sphere of scientific interests: accelerators physics, space devices development.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ

© 2011 И. Ю. Шумских

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Приведены результаты построения прогнозных моделей качества паяных соединений печатных узлов на основе припойных паст Solder XF3+. Для построения моделей были использованы регрессионный и программный комплекс «Прогнозирование 1.3». Рассмотрены три приёма преобразования результатов обучающего эксперимента: нормирование и центрирование контролируемых параметров, нормирование по математическому ожиданию, нормирование по дисперсии. Проведено исследование и дана сравнительная оценка математических моделей.

*Математическая модель, прогноз, преобразование параметров, паяные соединения, печатный узел, регрессия, обучение, эффективность прогнозирования.*

### Введение

Современный этап развития радиоэлектроники и телекоммуникационных систем характеризуется обострением проблемы надежности вследствие усложнения радиоэлектронных средств (РЭС), выражающегося как в резком увеличении количества используемых элементов и блоков, в появлении качественно новых ответственных функций, возлагаемых человеком, так и в расширении условий работы. На аппаратуру различного назначения приходится действовать в условиях интенсификации режимов работы и выполнять различные функции [1]. В силу этих причин повышаются требования к точности и эффективности выполнения заданных функций не только системой в целом, но и каждым отдельным элементом.

Высокие достигнутые уровни надежности электрорадиоизделий (ЭРИ) космического назначения, трудности их подтверждения традиционными методами испытаний, а также определяющее влияние на надежность скрытых дефектов, не выявляемых существующей системой технологического контроля и приемочных испытаний, определило развитие работ по исследованию механизмов и причин отказов, разработке методик диагностического неразрушающего контроля, прогнозирования показателей качества.

Одним из перспективных направлений в разработке эффективных и экономически приемлемых методов оценки качества и на-

дежности РЭС и ЭРИ является индивидуальное прогнозирование их будущего состояния [2-5]. Наименьшие затраты времени при индивидуальном прогнозировании обеспечивают методы теории распознавания образов [3]. Если число информативных параметров превышает два, то целесообразно использовать метод регрессионных моделей (регрессионный метод) [6].

### Методика построения моделей

Индивидуальное прогнозирование с использованием методов теории распознавания образов включает следующие основные этапы: обучающий эксперимент, обучение, экзамен и собственно прогнозирование.

Процедура обучающего эксперимента для паяных соединений (ПС) на основе припойных паст Solder XF3+ рассмотрена в предыдущей работе. В ней для прогнозирования качества ПС было рекомендовано три информативных параметра: вязкость (X1), клейкость (X2) и кислотное число (X3).

Для построения прогнозных моделей проведем обучение и экзамен. Выберем регрессионный метод, т.к. число информативных параметров больше двух. В качестве прогнозируемого параметра будем использовать поверхностное сопротивление изоляции (Y).

Обучение заключалось в обработке результатов обучающего эксперимента в соответствии с выбранным оператором прогнози-

рования. Теоретические основы и математический аппарат для данного этапа описаны в [7]. Построение моделей проводилось с использованием программного комплекса «Прогнозирование 1.3» [8]. В процессе обработки результатов обучающего эксперимента был сделан переход от оперирования со значениями информативных параметров к разностям этих значений и проведено нормирование и центрирование контролируемых информативных параметров, а также нормирование по математическому ожиданию и дисперсии.

За граничное значение прогнозируемого параметра (поверхностного сопротивления

изоляции) была принята величина  $1 \cdot 10^9$  Ом. Был выявлен фактический класс годности каждого экземпляра: годные – 1, не годные – 2 (табл. 1).

В табл. 2 представлены преобразованные данные по нормировке и центрированию.

В табл. 3 представлены преобразованные данные по нормировке математического ожидания (МО) признаков.

В табл. 4 представлены преобразованные данные по нормировке дисперсии признаков.

Таблица 1. Результаты обучающего эксперимента

Класс годности	Поверхностное сопротивление изоляции, $10^9$ Ом	Вязкость, Па·с	Клейкость, г	Кислотное число, мг КОН
1	1,5	202	112	124
2	0,7	158	96	117
1	1,2	199	110	124
1	1,1	184	106	126
2	0,7	241	91	113
1	2,6	210	112	123
2	0,5	224	114	102
1	2,1	205	112	123
1	1,7	200	111	124
1	1,3	195	109	124
1	1,1	183	106	125
1	1,1	161	100	128
2	0,9	190	106	120
1	2,1	213	112	123
1	1,2	191	107	126
1	1,1	238	100	126
1	2,3	210	112	123
1	2,5	212	113	123
2	0,9	185	106	119
1	2,8	225	114	122
1	2,4	208	112	123
2	0,5	231	116	115
1	2,2	205	111	124
1	1,9	196	110	124
1	2,2	210	112	123

Таблица 1. Окончание

Класс годности	Поверхностное сопротивление изоляции, $10^9$ Ом	Вязкость, Па·с	Клейкость, г	Кислотное число, мг КОН
2	0,5	238	117	111
1	1,2	198	111	124
1	2,3	213	112	123
1	1,5	196	109	124
2	0,5	245	90	110
2	0,7	239	95	115
1	1,2	181	105	126
2	0,3	242	92	109
1	1,5	201	112	124
1	1,5	200	112	124
2	0,8	231	104	119
1	1,2	195	109	125
1	2,2	210	112	123
2	0,9	227	105	120
1	2,1	211	112	123
2	0,8	229	104	117
2	0,7	233	102	115
1	1,3	195	108	124
1	2	204	111	123
2	0,5	230	104	113
1	2,2	220	114	122
1	2	215	112	123
2	0,9	229	114	119
1	1,5	199	110	124
1	1	192	105	120

Таблица 2. Преобразованные данные по нормировке и центрированию

№ кл.	Y1	X1	X2	X3	Y	Y*	dY
1	0,1521	-0,3463	0,6527	0,5950	1,5	1,7626	-0,2626
2	-1,0405	-2,5293	-1,8458	-0,7400	0,7	0,1786	0,5214
1	-0,2952	-0,4951	0,3404	0,5950	1,2	1,6533	-0,4533
1	-0,4442	-1,2393	-0,2842	0,9764	1,1	1,5177	-0,4177
2	-1,0405	1,5886	-2,6266	-1,5028	0,7	0,3281	0,3719
1	1,7918	0,0506	0,6527	0,4043	2,6	1,7495	0,8506
2	-1,3387	0,7452	0,9651	-3,6006	0,5	0,3076	0,1924
1	1,0465	-0,1975	0,6527	0,4043	2,1	1,7088	0,3912
1	0,4502	-0,4455	0,4966	0,5950	1,7	1,7039	-0,0039
1	-0,1461	-0,6936	0,1843	0,5950	1,3	1,5783	-0,2783
1	-0,4442	-1,2890	-0,2842	0,7857	1,1	1,4315	-0,3315
1	-0,4442	-2,3804	-1,2212	1,3578	1,1	1,2322	-0,1322

Таблица 2. Окончание

№ кл.	Y1	X1	X2	X3	Y	Y*	dY
2	-0,7424	-0,9417	-0,2842	-0,1678	0,9	1,0977	-0,1977
1	1,0465	0,1994	0,6527	0,4043	2,1	1,7738	0,3262
1	-0,2952	-0,8920	-0,1281	0,9764	1,2	1,6171	-0,4171
1	-0,4442	1,4398	-1,2212	0,9764	1,1	1,7016	-0,6016
1	1,3446	0,0506	0,6527	0,4043	2,3	1,7495	0,5506
1	1,6428	0,1498	0,8089	0,4043	2,5	1,8082	0,6918
2	-0,7424	-1,1897	-0,2842	-0,3585	0,9	0,9790	-0,0790
1	2,0900	0,7948	0,9651	0,2136	2,8	1,8782	0,9218
1	1,4937	-0,0486	0,6527	0,4043	2,4	1,7332	0,6668
2	-1,3387	1,0925	1,2774	-1,1214	0,5	1,4650	-0,9650
1	1,1956	-0,1975	0,4966	0,5950	2,2	1,7445	0,4555
1	0,7483	-0,6440	0,3404	0,5950	1,9	1,6289	0,2711
1	1,1956	0,0506	0,6527	0,4043	2,2	1,7495	0,4506
2	-1,3387	1,4398	1,4335	-1,8842	0,5	1,2519	-0,7519
1	-0,2952	-0,5448	0,4966	0,5950	1,2	1,6876	-0,4876
1	1,3446	0,1994	0,6527	0,4043	2,3	1,7738	0,5262
1	0,1521	-0,6440	0,1843	0,5950	1,5	1,5864	-0,0864
2	-1,3387	1,7871	-2,7828	-2,0749	0,5	0,0838	0,4162
2	-1,0405	1,4894	-2,0020	-1,1214	0,7	0,6380	0,0620
1	-0,2952	-1,3882	-0,4404	0,9764	1,2	1,4509	-0,2509
2	-1,6368	1,6382	-2,4704	-2,2656	0,3	0,0663	0,2338
1	0,1521	-0,3959	0,6527	0,5950	1,5	1,7545	-0,2545
1	0,1521	-0,4455	0,6527	0,5950	1,5	1,7463	-0,2463
2	-0,8915	1,0925	-0,5965	-0,3585	0,8	1,2678	-0,4678
1	-0,2952	-0,6936	0,1843	0,7857	1,2	1,6564	-0,4564
1	1,1956	0,0506	0,6527	0,4043	2,2	1,7495	0,4506
2	-0,7424	0,8940	-0,4404	-0,1678	0,9	1,3559	-0,4559
1	1,0465	0,1002	0,6527	0,4043	2,1	1,7576	0,3424
2	-0,8915	0,9933	-0,5965	-0,7400	0,8	1,0953	-0,2953
2	-1,0405	1,1917	-0,9089	-1,1214	0,7	0,8866	-0,1866
1	-0,1461	-0,6936	0,0281	0,5950	1,3	1,5358	-0,2358
1	0,8974	-0,2471	0,4966	0,4043	2	1,6582	0,3418
2	-1,3387	1,0429	-0,5965	-1,5028	0,5	0,7909	-0,2909
1	1,1956	0,5467	0,9651	0,2136	2,2	1,8375	0,3625
1	0,8974	0,2987	0,6527	0,4043	2	1,7901	0,2099
2	-0,7424	0,9933	0,9651	-0,3585	0,9	1,6763	-0,7763
1	0,1521	-0,4951	0,3404	0,5950	1,5	1,6533	-0,1533
1	-0,5933	-0,8424	-0,4404	-0,1678	1	1,0715	-0,0715
MO:	-1,5E-16	5,08E-16	1,04E-15	8,73E-16	1,398	1,398	-8,2E-16
DIS:	1	1	1	1	0,449	0,249	0,2000
SKO:	1	1	1	1	0,670	0,499	0,4473

Таблица 3. Преобразованные данные по нормировке MO

№ кл.	Y1	X1	X2	X3	Y	Y*	dY
1	1,0730	0,9666	1,0388	1,0258	1,5	2,8006	-1,3006

Таблица 3. Продолжение

№ кл.	Y1	X1	X2	X3	Y	Y*	dY
2	0,5007	0,7561	0,8904	0,9679	0,7	0,7919	-0,0919
1	0,8584	0,9522	1,0202	1,0258	1,2	2,4276	-1,2276
1	0,7868	0,8805	0,9831	1,0424	1,1	2,1052	-1,0052
2	0,5007	1,1532	0,8440	0,9348	0,7	-4,4475	5,1475
1	1,8598	1,0049	1,0388	1,0175	2,6	2,4218	0,1782
2	0,3577	1,0719	1,0573	0,8438	0,5	2,3320	-1,8320
1	1,5022	0,9810	1,0388	1,0175	2,1	2,6604	-0,5604
1	1,2160	0,9570	1,0295	1,0258	1,7	2,6380	-0,9380
1	0,9299	0,9331	1,0109	1,0258	1,3	2,3604	-1,0604
1	0,7868	0,8757	0,9831	1,0341	1,1	2,1559	-1,0559
1	0,7868	0,7704	0,9275	1,0589	1,1	1,6485	-0,5485
2	0,6438	0,9092	0,9831	0,9927	0,9	1,8367	-0,9367
1	1,5022	1,0192	1,0388	1,0175	2,1	2,2786	-0,1786
1	0,8584	0,9140	0,9924	1,0424	1,2	2,0293	-0,8293
1	0,7868	1,1389	0,9275	1,0424	1,1	-2,0202	3,1202
1	1,6452	1,0049	1,0388	1,0175	2,3	2,4218	-0,1218
1	1,7883	1,0145	1,0480	1,0175	2,5	2,5844	-0,0844
2	0,6438	0,8853	0,9831	0,9845	0,9	2,0782	-1,1782
1	2,0029	1,0767	1,0573	1,0093	2,8	2,2251	0,5749
1	1,7167	0,9953	1,0388	1,0175	2,4	2,5172	-0,1172
2	0,3577	1,1054	1,0759	0,9514	0,5	2,4756	-1,9756
1	1,5737	0,9810	1,0295	1,0258	2,2	2,3994	-0,1994
1	1,3591	0,9379	1,0202	1,0258	1,9	2,5708	-0,6708
1	1,5737	1,0049	1,0388	1,0175	2,2	2,4218	-0,2218
2	0,3577	1,1389	1,0851	0,9183	0,5	2,4115	-1,9115
1	0,8584	0,9475	1,0295	1,0258	1,2	2,7334	-1,5334
1	1,6452	1,0192	1,0388	1,0175	2,3	2,2786	0,0214
1	1,0730	0,9379	1,0109	1,0258	1,5	2,3127	-0,8127
2	0,3577	1,1724	0,8347	0,9100	0,5	-4,8876	5,3876
2	0,5007	1,1437	0,8811	0,9514	0,7	-3,3257	4,0257
1	0,8584	0,8661	0,9739	1,0424	1,2	1,9903	-0,7903
2	0,2146	1,1580	0,8533	0,9017	0,3	-4,2253	4,5253
1	1,0730	0,9618	1,0388	1,0258	1,5	2,8483	-1,3483
1	1,0730	0,9570	1,0388	1,0258	1,5	2,8960	-1,3960
2	0,5723	1,1054	0,9646	0,9845	0,8	-0,6331	1,4331
1	0,8584	0,9331	1,0109	1,0341	1,2	2,3575	-1,1575
1	1,5737	1,0049	1,0388	1,0175	2,2	2,4218	-0,2218
2	0,6438	1,0862	0,9739	0,9927	0,9	-0,1871	1,0871
1	1,5022	1,0097	1,0388	1,0175	2,1	2,3741	-0,2741
2	0,5723	1,0958	0,9646	0,9679	0,8	-0,5317	1,3317
2	0,5007	1,1149	0,9460	0,9514	0,7	-1,2328	1,9328
1	0,9299	0,9331	1,0017	1,0258	1,3	2,1024	-0,8024
1	1,4306	0,9762	1,0295	1,0175	2	2,4500	-0,4500
2	0,3577	1,1006	0,9646	0,9348	0,5	-0,5676	1,0676
1	1,5737	1,0527	1,0573	1,0093	2,2	2,4637	-0,2637

Таблица 3. Окончание

№ кл.	Y1	X1	X2	X3	Y	Y*	dY
1	1,4306	1,0288	1,0388	1,0175	2	2,1832	-0,1832
2	0,6438	1,0958	1,0573	0,9845	0,9	2,0431	-1,1431
1	1,0730	0,9522	1,0202	1,0258	1,5	2,4276	-0,9276
1	0,7153	0,9188	0,9739	0,9927	1	1,4832	-0,4832
MO:	1	1	1	1	1,398	1,398	-1,32E-15
DIS:	0,2302	0,0093	0,0035	0,0019	0,4500	4,0539	2,9966
SKO:	0,4798	0,0964	0,0594	0,0434	0,6708	2,0134	1,7311

Таблица 4. Преобразованные данные по нормировке дисперсии

№ кл.	Y1	X1	X2	X3	Y	Y*	dY
1	3,3334	0,4972	2,7312	4,5098	1,5	4,6778	-3,1778
2	1,5556	0,3889	2,3410	4,2552	0,7	12,4950	-11,7950
1	2,6667	0,4898	2,6824	4,5098	1,2	4,9326	-3,7326
1	2,4445	0,4529	2,5849	4,5826	1,1	8,0319	-6,9319
2	1,5556	0,5932	2,2191	4,1098	0,7	-12,9432	13,6432
1	5,7778	0,5169	2,7312	4,4735	2,6	2,3742	0,2258
2	1,1111	0,5514	2,7800	3,7097	0,5	-1,0070	1,5070
1	4,6667	0,5046	2,7312	4,4735	2,1	3,8153	-1,7153
1	3,7778	0,4923	2,7068	4,5098	1,7	4,9493	-3,2493
1	2,8889	0,4800	2,6580	4,5098	1,3	5,7806	-4,4806
1	2,4445	0,4505	2,5849	4,5462	1,1	8,3222	-7,2222
1	2,4445	0,3963	2,4386	4,6553	1,1	12,8271	-11,7271
2	2,0000	0,4677	2,5849	4,3644	0,9	6,3152	-5,4152
1	4,6667	0,5243	2,7312	4,4735	2,1	1,5096	0,5904
1	2,6667	0,4701	2,6093	4,5826	1,2	6,3194	-5,1194
1	2,4445	0,5858	2,4386	4,5826	1,1	-9,3613	10,4613
1	5,1112	0,5169	2,7312	4,4735	2,3	2,3742	-0,0742
1	5,5556	0,5218	2,7556	4,4735	2,5	2,1027	0,3973
2	2,0000	0,4554	2,5849	4,3280	0,9	7,7584	-6,8584
1	6,2223	0,5538	2,7800	4,4371	2,8	-1,3371	4,1371
1	5,3334	0,5120	2,7312	4,4735	2,4	2,9506	-0,5506
2	1,1111	0,5686	2,8287	4,1825	0,5	-2,4419	2,9419
1	4,8889	0,5046	2,7068	4,5098	2,2	3,5083	-1,3083
1	4,2223	0,4824	2,6824	4,5098	1,9	5,7973	-3,8973
1	4,8889	0,5169	2,7312	4,4735	2,2	2,3742	-0,1742
2	1,1111	0,5858	2,8531	4,0370	0,5	-4,1461	4,6461
1	2,6667	0,4874	2,7068	4,5098	1,2	5,5258	-4,3258
1	5,1112	0,5243	2,7312	4,4735	2,3	1,5096	0,7904
1	3,3334	0,4824	2,6580	4,5098	1,5	5,4923	-3,9923
2	1,1111	0,6031	2,1947	4,0007	0,5	-14,3947	14,8947
2	1,5556	0,5883	2,3166	4,1825	0,7	-11,1512	11,8512
1	2,6667	0,4455	2,5605	4,5826	1,2	8,5917	-7,3917
2	0,6667	0,5957	2,2435	3,9643	0,3	-12,9181	13,2181
1	3,3334	0,4948	2,7312	4,5098	1,5	4,9661	-3,4661
1	3,3334	0,4923	2,7312	4,5098	1,5	5,2543	-3,7543

Таблица 4. Окончание

№ кл.	Y1	X1	X2	X3	Y	Y*	dY
2	1,7778	0,5686	2,5361	4,3280	0,8	-6,1094	6,9094
1	2,6667	0,4800	2,6580	4,5462	1,2	5,7785	-4,5785
1	4,8889	0,5169	2,7312	4,4735	2,2	2,3742	-0,1742
2	2,0000	0,5588	2,5605	4,3644	0,9	-4,6537	5,5537
1	4,6667	0,5194	2,7312	4,4735	2,1	2,0860	0,0140
2	1,7778	0,5637	2,5361	4,2552	0,8	-5,5288	6,3288
2	1,5556	0,5735	2,4873	4,1825	0,7	-7,2874	7,9874
1	2,8889	0,4800	2,6337	4,5098	1,3	5,4756	-4,1756
1	4,4445	0,5021	2,7068	4,4735	2	3,7986	-1,7986
2	1,1111	0,5661	2,5361	4,1098	0,5	-5,8087	6,3087
1	4,8889	0,5415	2,7800	4,4371	2,2	0,1040	2,0960
1	4,4445	0,5292	2,7312	4,4735	2	0,9331	1,0669
2	2,0000	0,5637	2,7800	4,3280	0,9	-2,4837	3,3837
1	3,3334	0,4898	2,6824	4,5098	1,5	4,9326	-3,4326
1	2,2222	0,4726	2,5605	4,3644	1	5,4338	-4,4338
MO:	3,11E+00	5,14E-01	2,63E+00	4,40E+00	1,398	1,398	-1,08E-14
DIS:	2,2222	0,0024	0,0243	0,0363	0,4499	40,558	38,0692
SKO:	1,4907	0,0496	0,1561	0,1907	0,6708	6,3685	6,1700

По результатам обучения были построены следующие прогнозные модели:

- для первого приёма преобразования данных (нормирование и центрирование):

$$Y(X) = -14,3231 + 0,0081X1 + 0,0425X2 + 0,0781X3;$$

- для второго приёма преобразования данных (нормирование по математическому ожиданию):

$$Y(X) = -16,0965 - 0,0477X1 + 0,2581X2 - 0,0029X3;$$

- для третьего приёма преобразования данных (нормирование по дисперсии):

$$Y(X) = 29,0042 - 0,2882X1 + 0,3049X2 - 0,0021X3.$$

### Экзамен

Экзамен, как правило, состоит в оценке ошибки прогнозирования, вероятности правильных решений, рисков потребителя и изготовителя [9]. В ряде случаев оценивают и проверяют на соответствие требованиям ряд других характеристик [10].

Проведём исследование и анализ полученных моделей. Для этого воспользуемся программным комплексом «Прогнозирование 1.3». На рис. 1 приведена зависимость вероятностных характеристик от порога регрессионной функции  $\Pi$  для первого приёма преобразования данных. Из этого рисунка видно, что при  $\Pi > 1,5$  риск изготовителя равен нулю. Минимальное значение риска по-

ребителя составляет 0,32 при  $\Pi = 1,9 \dots 2,7$ . Минимальная вероятность ошибки будет при  $\Pi = 1,95 \dots 2,7$  и составляет 0,32.

На рис. 2 приведена аналогичная зависимость для второго приёма преобразования данных. Как видно из данного рисунка, минимальное значение риска потребителя также равно нулю 0,32, но уже при  $\Pi = 2,9 \dots 3,7$ , а риск изготовителя равен нулю при  $\Pi > 2,8$ . Вероятность ошибки при  $\Pi = 2,85 \dots 3,7$  по-прежнему равна 0,32.

На рис. 3, на котором приведена зависимость для третьего приёма преобразованных данных, видно, что риск потребителя минимален и равен 0,31 при  $\Pi = 9 \dots 13$ . Риск изготовителя при этом достигает нуля при  $\Pi > 13$ . Вероятность ошибки равна 0,32 при  $\Pi = 9 \dots 15$ .

### Выводы

Построены прогнозные модели качества паяных соединений и проведено прогнозирование их качества.

Было проведено также нормирование и центрирование данных выборки, их нормировка по математическому ожиданию и дисперсии признаков. Наименьшую дисперсию ошибки имеет первый приём преобразования данных.

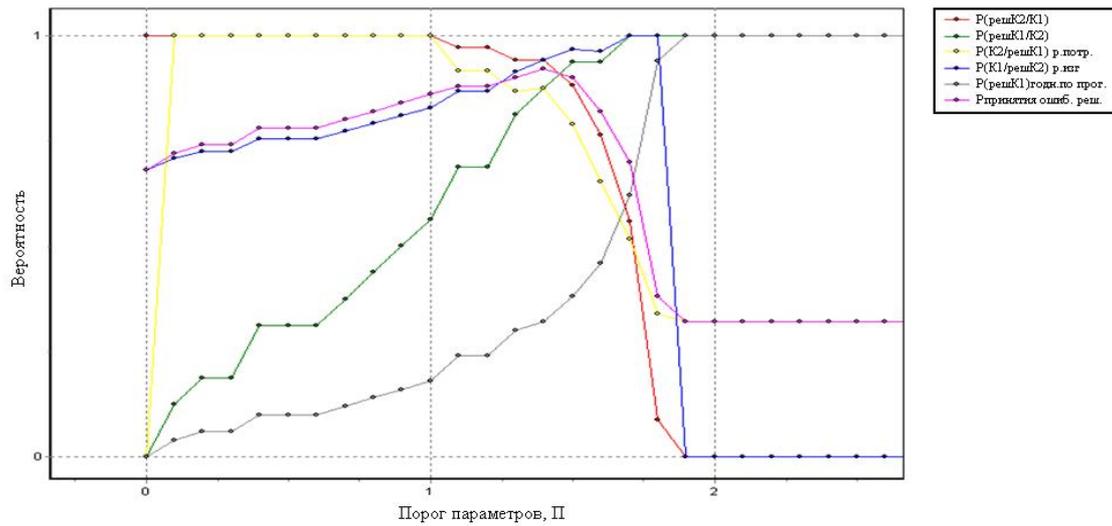


Рис. 1. Влияние порога регрессионной функции на эффективность прогнозной модели № 1

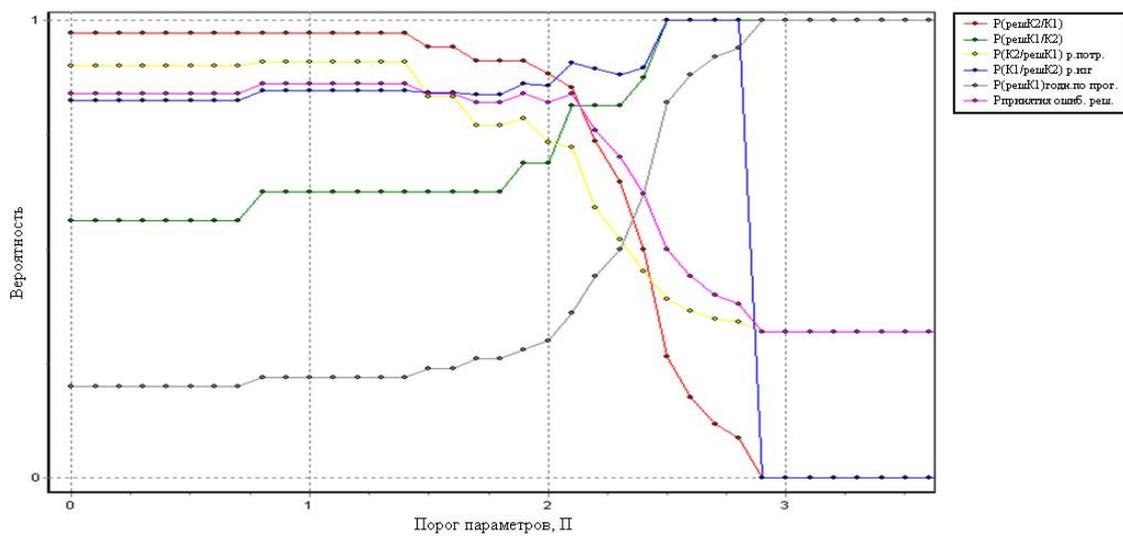


Рис. 2. Влияние порога регрессионной функции на эффективность прогнозной модели № 2

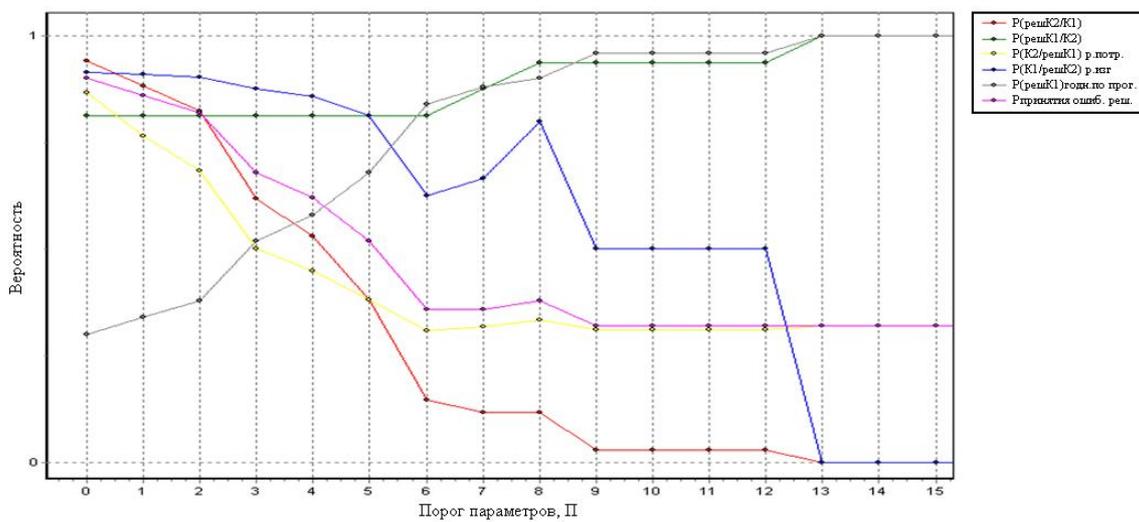


Рис. 3. Влияние порога регрессионной функции на эффективность прогнозной модели № 3

### Библиографический список

1. Сыноров, В. Ф. Физические основы надежности интегральных схем [Текст] / В. Ф. Сыноров, Р. П. Пивоварова, Б. К. Петров; Под. Ред. Ю. Г. Миллера. – М.: Сов. радио, 1976. – 320 с.
2. Гаскаров, Д. В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / Д. В. Гаскаров, Т. А. Голинкевич, А. В. Мозгалевский. – М.: Сов. Радио, 1974. – 224с.
3. Пиганов, М.Н. Прогнозирование надежности радиоэлектронных средств [Текст] / М. Н. Пиганов, С. В. Тюлевин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2009. - №1 (72). – 174-180с.
4. Тюлевин, С. В. Структурная модель индивидуального прогнозирования параметров космической аппаратуры [Текст] / С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов // Вестник СГАУ. – 2008. - № 1. – С. 92-96.
5. Пиганов, М. Н. Индивидуальное прогнозирование стабильности элементов микросборок [Текст] / М. Н. Пиганов, О. В. Карпов // Надежность и качество: Труды международного симпозиума. – Пенза: ПГУ, 2001. – С. 334-337.
6. Тюлевин, С. В. Структурная модель индивидуального прогнозирования параметров космической аппаратуры [Текст] / С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов // Вестник СГАУ. – 2008. - № 1. – С. 92-96.
7. Пиганов, М. Н. Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов и компонентов микросборок [Текст] / М. Н. Пиганов. – М.: Новые технологии, 2002. – 267 с.
8. Пиганов, М. Н. Прогнозирование надежности радиоэлектронных средств [Текст] / М. Н. Пиганов, С. В. Тюлевин // Перспективы развития телекоммуникационных систем и информационные технологии: Труды междунар. конф. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С. 423-440.
9. Пиганов, М. Н. Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов микросборок [Текст] / М. Н. Пиганов. – Самара: СГАУ, 1999. – 160 с.
10. Пиганов, М. Н. Технологические основы обеспечения качества микросборок [Текст] / М. Н. Пиганов. – Самара: СГАУ, 1999. – 231 с.

## QUALITY FORECASTING SOLDER JOINT ELECTRONIC COMPONENTS

© 2011 I. Y. Shumskikh

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The results of the construction of forecasting models of quality of solder joints of printed circuit assemblies based on solder pastes Cobar XF3+. To construct the models were used regression and software complex "Prognozirovanie 1.3". Examined three steps transform learning results of the experiment: valuation and alignment of controlled parameters, valuation of the expectation, valuation of the variance. Study and a comparative evaluation of mathematical models.

*Mathematical model, forecast, transformation parameters, solder joints, printed circuit assembly, regression, training, performance forecasting.*

### Информация об авторах

**Шумских Илья Юрьевич**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [il815@mail.ru](mailto:il815@mail.ru). Область научных интересов: качество паяных соединений электронных узлов.

**Shumskikh Ilya Urevich**, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [i1815@mail.ru](mailto:i1815@mail.ru). Research interests: quality of solder joints of electronic components.

## СЛЕПАЯ КОРРЕКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ВЕКТОРНОМ КАНАЛЕ С НЕИЗВЕСТНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

© 2011 А. А. Березовский, О. В. Горячкин

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

В работе получен алгоритм для слепой коррекции изображений, искажённых в векторном канале. Произведено сравнение полученного алгоритма с одним из ранее существовавших алгоритмов, представлены результаты моделирования. Показаны тестовые изображения, восстановленные сравниваемыми алгоритмами при различных уровнях аддитивных шумов.

*Слепая деконволюция, линейные искажения изображений, векторный канал, метод взаимных отношений, влияние аддитивных шумов.*

### Введение

Коррекция линейных искажений изображений различного происхождения (радиометрических, радиоастрономических, оптических, акустических, рентгеновских, инфракрасных) - это задача восстановления двумерного, пространственно ограниченного, неотрицательного сигнала [1], искажённого линейным оператором.

Источники линейных искажений - это, например, дефокусировка объектива оптической системы формирования изображения, скоростной сдвиг (смаз) изображения вследствие движения объекта в процессе экспозиции, различного рода дифракционные ограничения (т.е. ограничение пространственного спектра изображения регистрирующим устройством), влияние среды распространения (например, атмосферная турбулентность).

Часто исследователю известна форма импульсной характеристики искажающего изображения канала [2], тогда коррекция изображения может быть осуществлена линейным оптимальным или субоптимальным фильтром, построенным в соответствии с той или иной стратегией регуляризации [3].

Слепая коррекция изображений - задача, возникающая в случае отсутствия априорной информации об импульсной характеристике (ИХ) канала формирования. Особенно актуальна задача слепой коррекции линейных искажений изображений в задачах

дистанционного зондирования Земли, астрономии, в медицине.

Возможности слепой идентификации векторного канала формирования изображений несколько шире, чем скалярного. Это обстоятельство не раз отмечалось в литературе [4] по слепой обработке сигналов и исторически привело к более широкому применению методов слепой идентификации в данном случае.

### Алгоритм слепой коррекции многомерных сигналов

Для случая, когда имеется модель системы SIMO, т.е. имеется несколько реализаций искажённого изображения, прошедшего каналы с разной функцией рассеяния точки (ФРТ), можно применить метод, известный в литературе по слепой идентификации одномерных сигналов как метод взаимных отношений [4].

Пусть наблюдаемые искаженные изображения заданы  $M$  двумерными дискретными свертками, искажёнными независимыми аддитивными помехами:

$$y^i(k, m) = \sum_l \sum_n h^i(k-l, m-n)x(l, n) + v^i(k, m),$$

$$i = 1, \dots, M. \quad (1)$$

В отсутствии шума очевидна справедливость следующего равенства для неизвестных отсчётов импульсных характеристик:

$$\sum_{k, m} h^i(l-k, n-m)y^j(k, m) - \sum_{k, m} h^j(l-k, n-m)y^i(k, m) = 0,$$

$$i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, M. \quad (2)$$

Наличие шума нарушает равенство, поэтому будем искать решение, применяя универсальный метод наименьших квадратов, т.е.

$$\hat{h} = \underset{h}{\operatorname{argmin}} \sum_i \sum_j d_{i,j},$$

$$\sum_i \sum_n \left| \sum_k \sum_m h^i(l-k, n-m) y^j(k, m) - \sum_k \sum_m h^i(l-k, n-m) y^j(k, m) \right|^2;$$

(3)

при дополнительном условии, исключающем тривиальное нулевое решение:

$$\sum_i \sum_k \sum_m |h^i(k, m)|^2 = M, \quad (4)$$

где  $d_{i,j}$  - нормирующие множители, необходимые в случае различия дисперсии аддитивного шума в подканалах;  $c$  – константа.

Используя метод множителей Лагранжа и равенство Парсеваля для двумерного дискретного преобразования Фурье, получим следующее выражение:

$$\hat{h} = \underset{h}{\operatorname{argmin}} J(h),$$

$$J(h) = \sum_i \sum_j d_{i,j} \sum_l \sum_n |h_\omega^j(l, n) y_\omega^i(l, n) - h_\omega^i(l, n) y_\omega^j(k, m)|^2 + \lambda \sum_i \sum_k \sum_m |h_\omega^i(k, m)|^2.$$

(5)

Одним из основных методов решения задач типа (5) является метод градиентного спуска. В рамках этого метода минимизация функционала  $J(h)$  проводится в рамках итерационного процесса:

$$h^k = h^{k-1} - \beta_k \operatorname{grad}(J(h^{k-1})). \quad (6)$$

Вычисляя градиент выражения (5), получим следующую формулу для расчёта спектральных отсчётов импульсных характеристик на  $k$ -м шаге итерации:

$$h_\omega^{j,k}(l, n) = (1 - \beta_k) h_\omega^{j,k-1}(l, n) + \beta_k \frac{y_\omega^j(l, n) \sum_{i, j \neq i} d_{i,j} h_\omega^{i,k-1}(l, n) y_\omega^{*j}(l, n)}{\sum_{i, j \neq i} d_{i,j} |y_\omega^j(l, n)|^2 + \lambda}.$$

(7)

На каждом шаге итерации используется тот же оператор проектирования, что и в [5].

### Экспериментальные результаты

В результате проведенного математического моделирования работы описанных алгоритмов получена зависимость относи-

тельной погрешности восстановления изображения от отношения сигнал/шум, показанная на рис. 1. Для качественного анализа эффективности работы алгоритмов на рис. 2 показаны результаты моделирования линейных искажений в 3-х канальной системе регистрации изображений.

### Заключение

В статье выведен и исследован алгоритм слепой коррекции векторных изображений, который включает в себя критерий для минимизации и формулы, оценивающие ФРТ.

В результате проведенного моделирования установлено, что полученный нами алгоритм по евклидовому расстоянию остается ближе к истинному изображению, чем алгоритм Катковника [5], при различных уровнях шумов. Были продемонстрированы изображения, восстановленные обоими алгоритмами при разных уровнях шумов, из которых видно, что при больших шумах в алгоритме теряются малоразмерные детали, в то же время у представленного алгоритма этого эффекта не наблюдается.

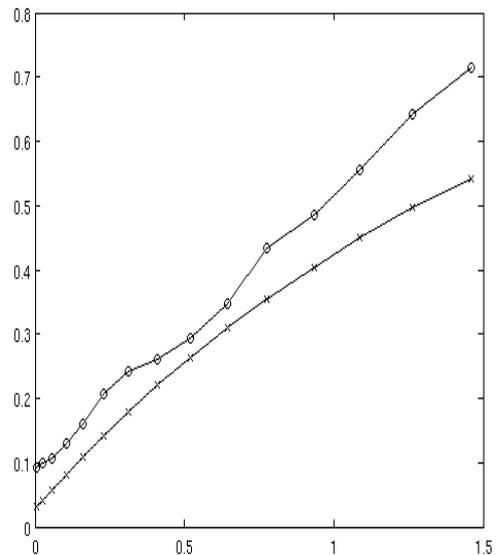


Рис. 1. Зависимость относительной погрешности восстановления изображения от дисперсии шума: O - алгоритм Катковника [5]; X - предлагаемый модифицированный алгоритм

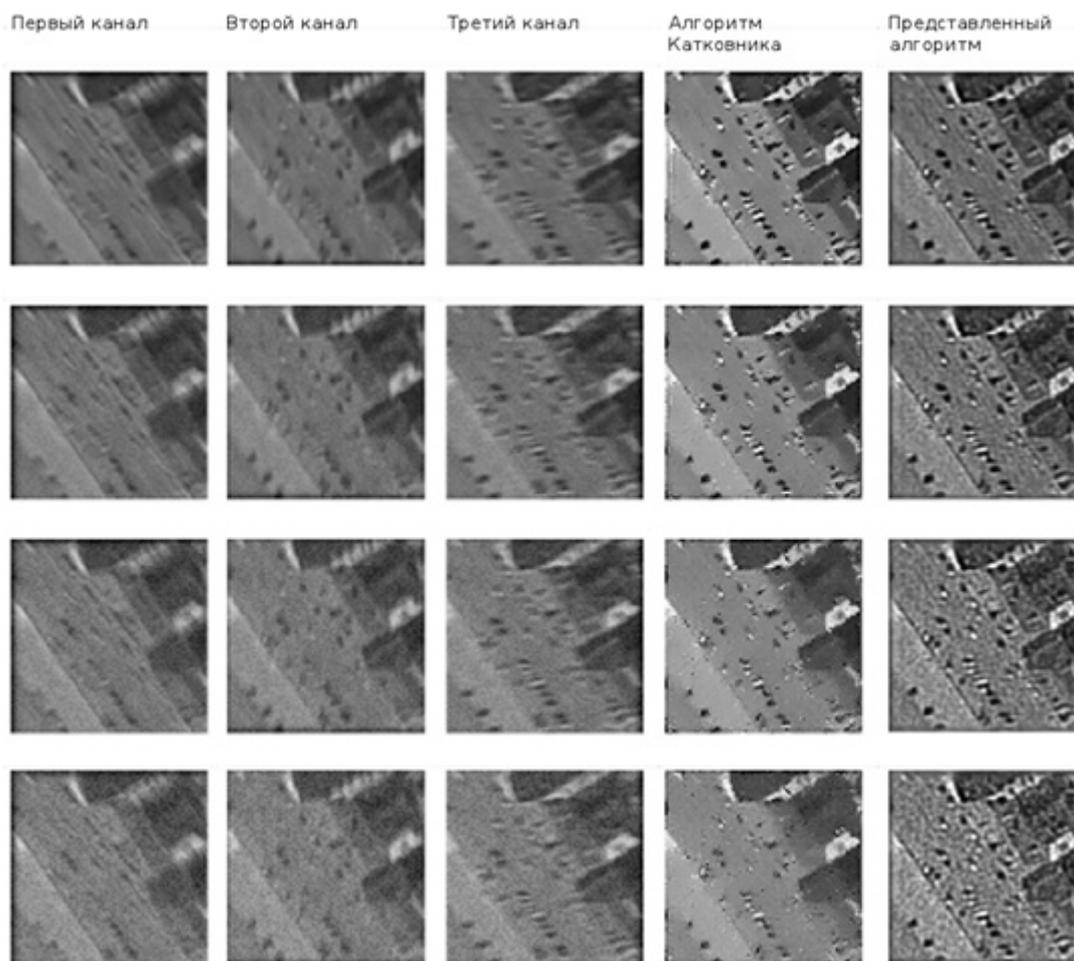


Рис. 2. Результаты моделирования, представленные для качественного анализа

#### Библиографический список

1. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2001. – 784 с.
2. Василенко, Г. И. Восстановление изображений [Текст] / Г. И. Василенко, А. М. Тараторин. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
3. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач [Текст] / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1986. – 320 с.
4. Горячкин, О. В. Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники и связи [Текст] / О. В. Горячкин. – М.: Радио и связь, 2003. – 230 с.
5. Katkovnik V., Paliy D., Egiazarian K., Astola J. Frequency domain blind deconvolution in multiframe imaging using anisotropic spatially-adaptive denoising // Proceedings of EUSIPCO, 2006. – 5p.

## MULTICHANNEL BLIND IMAGE DECONVOLUTION ALGORITHM

© 2011 A. A. Berezowskii, O. V. Goryachkin

Povolzhskiy State University of Telecommunication and Information

The paper deals with blind deconvolution algorithm for the images distorted in the vector channel. The obtained algorithm is compared to one of the most effective pre-existing algorithms. The article shows the results of the simulation and the images of different noise levels restored by each of the algorithms.

*Blind deconvolution, SIMO, image deblurring, additive noise.*

### Информация об авторах

**Березовский Андрей Андреевич**, аспирант, м.н.с. центра радиолокационного зондирования Земли (ЦРДЗЗ), Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики. E-mail: [andrey.berezowskiy@gmail.com](mailto:andrey.berezowskiy@gmail.com). Область научных интересов: слепая коррекция изображений.

**Горячкин Олег Валериевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники и связи, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики. E-mail: [gor@psati.ru](mailto:gor@psati.ru). Область научных интересов: цифровая обработка сигналов в системах радиотехники и связи, радиофизические методы дистанционного зондирования Земли, радиолокация с синтезированием апертуры антенны, слепая идентификация систем, прикладная статистика.

**Berezowskiy Andrey Andreevich**, post-graduate student, junior center of the radar sensing (TSRDZZ), Volga state university of telecommunications and informatki. E-mail: [andrey.berezowskiy@gmail.com](mailto:andrey.berezowskiy@gmail.com). Scientific interests: focus on blind image deconvolution.

**Goryachkin Oleg Valerievich**, doctor of technical sciences, professor, head of the theoretical foundations of radio engineering and communication, Volga State University of Telecommunications and Information. E-mail: [gor@psati.ru](mailto:gor@psati.ru). Scientific interests: digital processing of signals in the systems of radio engineering and communications, the radiophysics methods of the remote sensing of the Earth, radar with the synthesizing of the aperture of antenna, the blind identification of systems, applied statistics.

## МЕТОДИКА УСКОРЕННЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНО МОНТИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ

© 2011 А. В. Наседкин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Рассмотрена методика ускоренных исследовательских испытаний паяных соединений, описаны критерии отказа таких соединений. Предложена конструкция тестового модуля. Выбрана модель надежности паяного соединения.

*Ускоренные испытания, электрорадиоизделия, поверхностный монтаж, паяные соединения, тестовый модуль, модель.*

### Введение

Изготовление и выведение в космос изделий - очень дорогостоящие процессы. Отказавший в космосе прибор не подлежит ремонту и процедурам выявления причин отказа. По этим причинам к качеству изделия заказчики предъявляют очень серьезные требования, одно из которых - длительный срок активного существования. При использовании поверхностно монтируемых электрорадиоизделий (ЭРИ) ИП с бессвинцовым покрытием выводов остро встает вопрос качества паяных соединений (ПС) и таких дефектов, как оловянные усы, дендриты, оловянная чума и др. Для прогнозирования отказов и их раннего выявления с целью корректировки технологии изготовления необходимо проводить исследовательские испытания паяных соединений. Ввиду того, что срок активного существования изделия может достигать до пятнадцати лет, проведение обычных испытаний будет слишком длительным и дорогостоящим процессом, и поэтому на первый план выходят методы ускоренных испытаний.

### Критерии отказа при испытании паяных соединений

Одна из наиболее сложных задач, которая стоит при проведении ускоренных испытаний - это определение усталости паяного соединения и его последующее обнаружение.

Сравнение результатов испытаний может затрудняться либо вообще быть невозможным из-за несопоставимости критериев отказа. К этим критериям относятся: периодический визуальный контроль появления трещин в паяном соединении, поиск нарушения структуры паяного соединения по снижению исходной прочности через определённые интервалы времени, наблюдение петель гистерезиса «напряжение-деформация» для отдельных паяных соединений, а также определение отказа в терминах характеристик петель гистерезиса, контроль электрического сопротивления по величине возрастания относительно исходного, мониторинг электрического сопротивления с целью обнаружения кратковременных электрических обрывов.

Критерии отказа, требующие периодического прерывания испытаний, могут значительно продлить время, необходимое для проведения испытаний, нарушить условия эксперимента и повлиять на результаты. Случайно выбранные определения отказа могут служить в качестве индикаторов разрушения лишь в случае, если они выполняются согласованно. Однако наличие множества различных определений отказа и используемых методов измерений затрудняет сравнение.

Для проведения ускоренных испытаний на надёжность необходимо использовать следующие критерии. Отказ определяется как первое прерывание электрической целостности

сти цепи, которое подтверждено девятью дополнительными прерываниями в пределах дополнительных 10% от циклической долговечности.

Обнаружение отказа должно осуществляться путем непрерывного контроля последовательной топологии испытательных контуров следующим образом:

- не менее одного прерывания цепи продолжительностью не более 1 микросекунды может быть зарегистрировано для каждого измерительного контура в течение любого интервала опроса длительностью не более 2 секунд;

- не менее 10 таких прерываний на каждый измерительный контур может быть зарегистрировано для подтверждения индикации первого отказа;

- контрольный ток не превышает 2мА при напряжении не более 10 В и разрыв электрической цепи определяется по сопротивлению контура, равному 1000 Ом и более.

### Планирование эксперимента

В характеристике надёжности важно установить параметры корреляции между ускоренным воздействием напряжений и внешними условиями при конечном применении.

При планировании эксперимента необходимо предусмотреть проверку как минимум двух независимых переменных, чтобы сравнить их с зависимой. При испытаниях паяного соединения на надёжность единственной зависимой переменной является количество циклов, воздействию которых подвергается прибор. Циклическое воздействие

имитирует эксплуатацию прибора и связывается с условиями обстановки конечного применения. Тогда независимыми переменными следует считать следующие:

- размах колебаний температуры;
- размеры компонента;
- коэффициенты теплового расширения;
- высоту галтели паяного соединения;
- жесткость выводов;
- вероятность отказа.

### Тестовый модуль

Все компоненты должны быть подготовлены для внутреннего межсоединения выводов таким образом, чтобы при соединении с рисунком подложки печатного узла образовалась завершённая топология измерительного контура.

Схема соединений выводов зависит от количества входов/выходов компонента (рис. 1) и выглядит следующим образом:

- 1 вход/выход: соединить два вывода;
- 2 входа/выхода: соединить все три вывода вместе;
- или более входов/выходов: соединить только выводы, расположенные на одной и той же стороне.

Начинать необходимо от углов, попеременно выполняя внутреннее соединение пар выводов, продвигаясь по направлению к центру соответствующей стороны компонента. Если вдоль стороны компонента расположено нечётное количество выводов, центральный вывод не подключается к измерительному контуру и на схеме соединений пропускается (рис. 2).

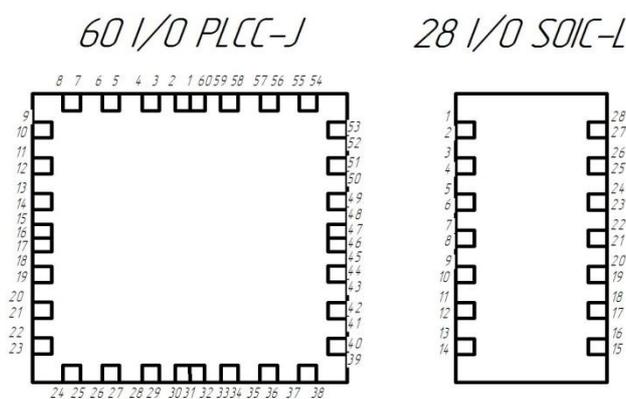


Рис. 1. Пример соединений выводов двух различных микросхем

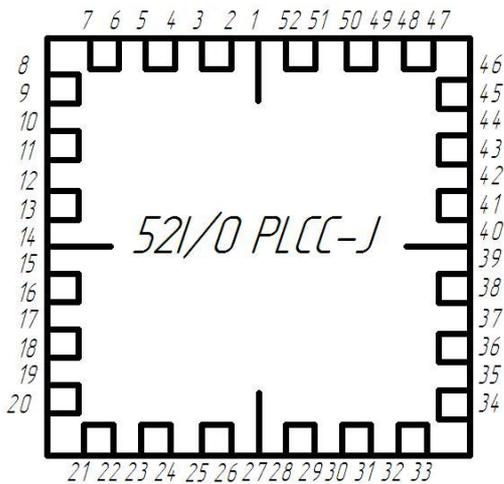


Рис. 2. Пример соединений выводов с нечётным количеством на одной стороне

В качестве имитаторов ЭРИ были выбраны компоненты фирмы TopLine Dummy Components, являющейся лидером по качеству выпускаемой продукции.

### Выбор модели надежности

В связи с тем, что в процессе испытаний не происходит восстановление паяных соединений, то получение последующих данных может служить основанием для определения параметра потока отказов.

Сбор, учёт, накопление, обработка и анализ отказов образцов тестовых модулей в процессе ускоренных испытаний должен производиться на основе заполнения карточек учёта отказа.

Для прогнозирования уровня надежности ПС выбрана математическая модель на основе  $\chi^2$  – распределения, которая позволяет дать количественную надёжностную оценку ПС при относительно малом времени испытаний и малой степени выборки по результатам испытаний, а также установить связь традиционных показателей надёжности с полученными результатами испытаний.

На языке теории групп можно сказать, что множество результатов испытаний выделяет с помощью оператора  $\chi^2$  ряд подмножеств. Элементы ряда образуют аддитивную группу. Выделение любого частичного объединения или хотя бы одного из элементов ряда даёт аддитивную же подгруппу. Использование теории групп очень перспективно в

развитии данного подхода при обработке результатов испытаний.

Продemonстрируем построение величины  $\chi^2$  и особенности ее применения при оценке надежности любой подгруппы изделий. Назовем  $p$  — вероятность появления отказа,  $q = 1 - p$ . Тогда при испытании  $N$  образцов

$$\chi^2 = \frac{(x - Np)^2}{Np} + \frac{(y - Nq)^2}{Nq}, \quad (1)$$

где  $x$  - число отказов;  $y = N - x$ .

Так как практически всегда  $q \ll p$ , то выражение можно переписать в виде

$$\chi^2 = \frac{(x - Np)^2}{Np}. \quad (2)$$

Известно, что в этом случае распределение числа отказов  $x$  подчинено закону Пуассона

$$P_x = \frac{(Np)^x}{x!} e^{-Np}. \quad (3)$$

Из этих выражений следует, что выполняется первое предположение о моделях, если выполняется второе.

Два равенства

$$x + y = N, \quad (4)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{x=0}^N P_x(N) = 1, \quad (5)$$

с учётом  $N \gg 1$  определяют минимальное число степеней свободы, равное 2.

При испытаниях две степени свободы соответствуют отсутствию отказов, так как предполагается  $q = 1$ . В этом случае распределение величины  $u = \chi^2/2$  будет экспоненциальным. Если в процессе испытаний был зарегистрирован отказ, то это означает, что число степеней свободы становится больше двух. Каждый отказ эквивалентен, по крайней мере, одному новому условию связи (речь идет о факте, считающемся непреложным). Будем считать, что каждый отказ генерирует дополнительно две степени свободы. Тогда не могут возникать дробные степени в распределении  $\chi^2$ . Общее число степеней свободы  $m = 2n + 2$ . Соответственно, меняются квантили распределения и возрастает вероятность отказа [1]. С учётом изложенного вычисляется интенсивность отказов (Failure Rate):

$$FR = \frac{x_{1-\alpha}^2(m)}{2NHAt}, \quad (6)$$

где  $N$  — число ПС, поставленных на испытания;  $H$  — число часов при испытании под нагрузкой;  $A_t$  — коэффициент ускорения.

### Конструктивные требования

Конструкция тестового печатного узла должна допускать непрерывный электрический контроль в течение полного теплового цикла. Технология изготовления печатной платы (ПП), количество слоёв, защитное покрытие и покрытие контактных площадок должно быть идентичным штатной ячейке.

При проектировании печатного узла была использована программа Altium Designer, содержащая мощные средства интерактивного размещения компонентов и трассировки проводников, которые совместно с интуитивной и полностью визуализированной системой установки правил проектирования максимально упрощают процесс разработки электроники. Инструменты трассировки учитывают все требования, предъявляемые современными технологиями разработок, например, при трассировке дифференциальных пар или VGA компонентов. В состав программы входит автоматический трассировщик Situs, в котором используются наиболее прогрессивные алгоритмы трассировки печатных проводников. Принципиальным отличием последней версии Altium Designer является поддержка двунаправленной работы с механическими деталями и моделями компонентов в формате STEP. В дополнение к мощным средствам разработки Altium Designer имеет широкие возможности импорта и экспорта сторонних систем проектирования и поддерживает практически все стандартные форматы выходных файлов (Gerber, ODB++, DXF и т. д.). Монтаж платы выбран односторонним для облегчения процесса рентгенконтроля.

Основные конструктивные параметры тестового модуля имеют следующие значения:

- габаритные размеры (длина, ширина) 160x160 мм;
- толщина МПП 1,8мм;
- минимальная ширина печатного проводника 0,1мм;
- минимальный зазор между смежными печатными элементами 0,1мм;
- диаметр переходного отверстия (до металлизации) 70мкм;
- размер печатного пояска вокруг металлизированного отверстия 30 мкм;
- количество слоев ПП 14;
- минимальный зазор между контактной площадкой и паяльной маской по периметру 50 мкм;
- минимальная ширина перемычки в паяльной маске 0,1 мм.
- покрытие контактных площадок – Гор.ПОС-61(HASL);
- стеклотекстолит, из которого изготовлена ПП: FR-4+ толщиной 0,10...0,20мм, двухсторонний фольгированный, фольга медная 35мкм;
- паяльная маска Dynamask KM 75 фирмы Morton, зеленая (толщина 75мкм)[2].

Печатный узел с установленными ЭРИ приклеивается к плоскому основанию металлической рамки через прокладку. Для приклейки печатного узла к рамке можно использовать ЭЛАСИЛ-137 либо компаунд КТ-102, но выбор был остановлен на последнем, так как этот компаунд используется на штатной ячейке и не внесёт погрешности в исследование.

Металлическая рамка изготовлена из алюминиевого сплава марки типа Д16 с покрытием Ан.Окс.н.хр., имеет плоское основание и замкнутую по периметру обечайку.

В металлической рамке выполнены окна: в обечайке для прохождения разъема; в основании на плоскости металлической рамки для прохождения ЭРИ, установленных на ПП.

Закрепление тестовых модулей аналогично креплению штатных ячеек в блоке показано на рис. 3.

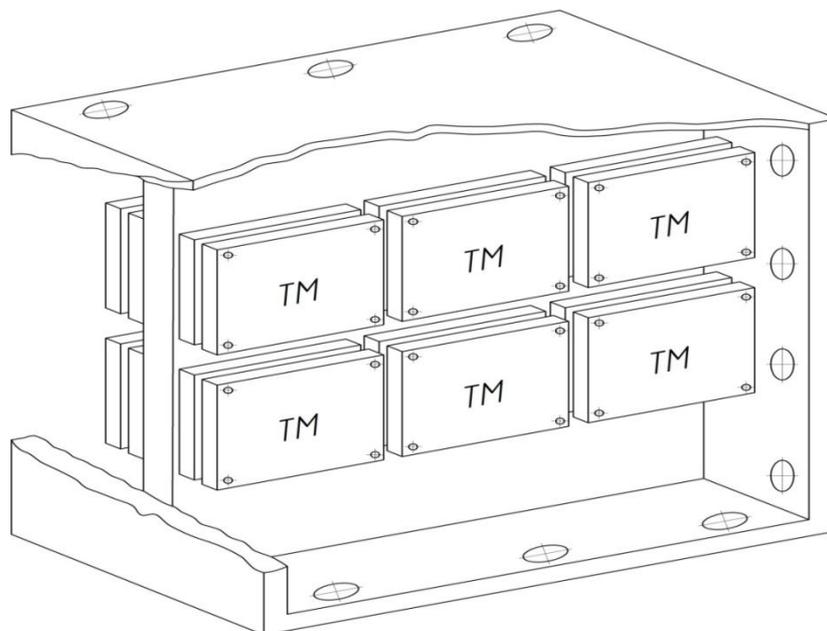


Рис. 3. Эскиз тестового электронного блока

#### Библиографический список

1. Абомелик, Т. П. Методы и средства испытаний РЭС: методические указания [Текст] / Т. П. Абомелик, М. В. Теленкова. - Ульяновск: Ул.ГТУ, 2008. - 21с.

2. Федулова, А. А. Многослойные печатные платы [Текст] / А. А. Федулова, Е. П. Котов, Э. Р. Явич. - М.: Сов.радио. - 1977.- 248с.

### METHOD OF ACCELERATED TEST RESEARCH SOLDERED JOINTS SURFACE MOUNT DEVICES

© 2011 A. V. Nasedkin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The method of accelerated testing of solder joints of research, described the criteria for refusal of such compounds. The design of the test module. Model is chosen reliability of the solder joint.

*Accelerated testing, surface mount, solder joints, tests module, model.*

#### Информация об авторе

**Наседкин Алексей Васильевич**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: испытания электронных узлов космической аппаратуры.

**Nasedkin Aleksei Vasilevich**, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Field of research: testing electronic components of spacecraft.

ББК 65.29

**МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ**

© 2011 А. Д. Краснощёков, С. В. Тюлевин, И. Н. Козлова, А. В. Токарева

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Рассмотрены вопросы управления деятельностью предприятий. Для оптимизации процессом управления предложен метод имитационного моделирования маршрутов перевозок. Приведён оптимальный план.

*Управление, моделирование, оптимизация, маршрут перевозки, план.*

Управление деятельностью любого предприятия в современных условиях относится к числу сложных и трудоемких процессов, эффективность которых определяется умением рационально сочетать разнообразные методы исследования систем управления.

Всё многообразие разработанных на сегодняшний день методов условно можно разделить на следующие группы:

- методы, основанные на использовании знаний и интуиции специалистов;
- методы формализованного представления систем;
- методы формализованного представления потоков;
- комплексные методы.

При исследовании систем управления наибольшее распространение получили методы формализованного представления систем и исследования информационных потоков.

В управлении деятельностью предприятий в настоящее время важную роль играет моделирование, представляющее собой разновидность методов формализованного представления систем. Причем следует подчеркнуть, что моделирование экономического процесса тесно связано с информационным обеспечением, поскольку предполагает использование как внутренней информации, так и внешней, на основе которой и проводятся различные вычисления для построения моделей, поэтому эти методы зачастую рассматриваются в комплексе.

Использование на практике методов моделирования хозяйственных ситуаций позволяет выбрать экономически эффективные стратегии и тактически верные управленческие решения. Моделирование позволяет не только выполнить быстрые и безошибочные вычисления, но и проводить многовариантный анализ функционирования и развития экономических систем, особенно в реальных условиях, а не только в гипотетических, виртуальных условиях с участием эксперта. Главная задача в процессе моделирования – максимально эффективно использовать положительные параметры, реализовывать заложенные в них преимущества. Имитационное моделирование – это процесс конструирования модели реальной системы и постановка экспериментов на этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить (в рамках ограничений, накладываемых некоторыми критериями или совокупностью критериев) различные стратегии, обеспечивающие функционирование данной системы.

Так при решении транспортной задачи ограничивающими факторами могут быть: транспортный ресурс, ограниченная провозная способность и другие ограничения по возможности плавания в определенных бассейнах. Рассматриваемая задача сводится к тому, чтобы наивыгоднейшим образом прикрепить пункты потребления продукции ( $j=1,2,\dots,m$ ) к пунктам ее производства ( $i=1,2,\dots,n$ ) с учётом достижения наиболее эффективного распределения перевозок между  $K$ -ми ( $K=1,2,\dots,\delta$ ) различными видами сообщений. Под  $K$ -м видом сообщения в дан-

ном случае понимается использование одного вида транспорта на рассматриваемом направлении перевозок  $ij$ .

Решение задачи сводится к определению множества  $\{x_{ijk}\}$  при следующих ограничениях:

1) потребность продукции каждого  $j$ -го пункта удовлетворяется полностью:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{K=1}^{\delta} X_{ijk} = B_j (j = 1, 2, \dots, m),$$

где  $X_{ijk}$  - количество единиц, доставляемое из  $i$ -го пункта в  $j$ -й с помощью  $K$ -го вида сообщения;  $B_j$  - объём потребителя в  $j$ -м пункте назначения;

2) вся продукция из каждого  $i$ -го пункта отправляется:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{K=1}^{\delta} X_{ijk} = A_i (i = 1, 2, \dots, n),$$

где  $A_i$  - объём производства в  $i$ -м пункте отправления;

3) используемая провозная (пропускная) способность  $K$ -го вида транспорта не может превышать располагаемых ресурсов:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ijk} \leq N_K;$$

$$K = 1, 2, \dots, \delta,$$

где  $P_{ijk}$  - удельная потребность подвижного состава  $K$ -го вида транспорта для доставки единицы продукции из  $i$ -го пункта в  $j$ -й пункт,  $N_K$  - наличие подвижного состава  $K$ -го вида транспорта;

4) отыскиваемые неизвестные варианты

не должны быть выражены отрицательными числами:

$$x_{ijk} \geq 0$$

для всех  $i, j, K$ ;

5) транспортные издержки на перемещение продукции достигают минимума:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{K=1}^{\delta} \dot{Y}_{ijk} X_{ijk} \rightarrow \min.$$

Предложенная выше методика может быть пояснена следующим примером.

Имеются три пункта добычи нефти:  $a_1, a_2, a_3$ , в каждом из которых добывается соответственно 1500, 2000, 3000 тысяч тонн. Пунктами потребления нефти являются  $b_1, b_2, b_3$ , каждый из которых потребляет соответственно 1500, 1500, 2500 тысяч тонн. Транспортировка нефти возможна из всех пунктов добычи во все пункты потребления при участии в перевозках различных видов транспорта (железнодорожного, речного, трубопроводного). Провозная способность и экономические показатели на отдельных направлениях перевозок определены для железнодорожного состава из 50 цистерн грузоподъемностью по 50 т, для речного состава - из барж грузоподъемностью 8600 т и толкача мощностью 1340 л.с. Предполагается, что пропускная способность трубопровода за период составляет 1000 тыс. т, железная дорога располагает 115, а речной транспорт - 90 составами. Народнохозяйственные затраты на перемещение груза между пунктами добычи и потребления различными видами транспорта неодинаковы.

Таблица 1. Оптимальный план

Пункт добычи	Пункт потребления	Объём перевозок, тыс.т.	Железная дорога	Река	Трубопровод
A <sub>1</sub>	B <sub>3</sub>	88.46	-	-	
A <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	911.54	B <sub>3</sub> B <sub>2</sub>	-	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	500	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub>	-	-
A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	1500	A <sub>2</sub> P	PB <sub>1</sub>	-
A <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	500	A <sub>2</sub> P	PB <sub>3</sub>	-
A <sub>3</sub>	B <sub>2</sub>	88.46	A <sub>2</sub> dB <sub>2</sub>	-	-
A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	1911.54	-	-	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub>

При таком распределении перевозок между различными видами транспорта народнохозяйственные затраты на доставку нефти будут минимальными. При этом потребность в нефти пунктов  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  удовлетворяются в намеченном объеме. Оказалась полностью использованной провозная способность трубопровода и провозная способность 90 речных составов, в резерве осталось 4 железнодорожных состава.

Изложенная методика позволяет решать также задачи, когда объемы производства и потребления не сбалансированы.

В процессе разработки систем экономического планирования и управления метод имитационного моделирования находит применение как способ проверки и экспериментального апробирования приложений, вытекающих из теоретических предположений, а также как путь создания диалоговой человеко-машинной системы.

Велика роль имитационного моделирования при экспериментальной проверке предложений, связанных со структурными изменениями, модернизацией экономических механизмов и другими усовершенствованиями, не поддающимися формальному количественному описанию.

Главная задача в процессе моделирования – понять особенности применяемых систем и методов с тем, чтобы, нивелируя их негативные стороны, максимально эффективно использовать заложенные в них преимущества.

Описание реальных отношений между экономическими объектами и протекание

планово-производственных процессов в наиболее полной мере и рациональнее осуществляется с помощью имитационного моделирования. В основе любого рода моделей лежит концептуальная схема моделирования процесса и аппарат описания. Концептуальная схема является необходимым атрибутом процесса построения моделей и может использоваться либо явно, либо быть за «кадром» проводимых рассуждений. В рассмотренном ранее примере транспортной задачи концептуальной схемой является потоковая сеть с дискретными элементами, размещёнными на дугах, аппаратом построения модели – аппаратом линейного программирования.

Процесс исследования систем управления при помощи моделирования во многом является искусством, где важное значение имеет понимание структуры системы, знания правил её функционирования и умение выделить в них самое существенное, исключив ненужные детали или факторы. Модель должна быть, с одной стороны, простой для понимания, но в то же время достаточно сложной, чтобы реалистично отображать характерные черты исследуемой системы управления.

#### **Библиографический список**

1. Багринский, К. А. Имитационные системы принятия экономических решений [Текст] / К. А. Багринский, М. Р. Левинсон. – М.: Наука, 1989.
2. Иванищев, В. В. Управление на сетях с переменной структурой [Текст] / В. В. Иванищев, А. Д. Краснощёков. - М.: Наука, 1982.

## **MODELING IN MANAGEMENT SYSTEMS**

© 2011 A. D. Krasnoschekov, S. V. Tyulevin, I. A. Kozlova, A. V. Tokareva

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev  
(National Research University)

The problems of management on enterprises. In order to optimize process control method is proposed simulation of transport routes. Is an optimal plan.

*Control, simulation, optimization, route of transportation, the plan.*

## Информация об авторах

**Краснощёков Анатолий Дмитриевич**, профессор кафедры конструирования и производства радиотехнических средств, д. т. н., профессор, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: управление деятельностью предприятий.

**Тюлевин Сергей Викторович**, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, кандидат технических наук, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: надёжность и качество космических радиоэлектронных средств.

**Козлова Ирина Николаевна**, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: деградация полупроводниковых приборов.

**Токарева Алёна Викторовна**, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: надёжность и качество радиоэлектронных средств.

**Krasnoschekov Anatoly Dmitrievich**, professor of design and manufacture radio aids department, Dr. sc. professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: management of enterprises.

**Tyulevin Sergei Viktorovich**, assistant professor of design and production radio-electronic means department, Ph.D., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: quality and reliability of space-based radio-electronic means.

**Kozlova Irina Nikolaevna**, post-graduate student of design and manufacture electronic resources department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: the degradation of semiconductor devices.

**Tokareva Alena Viktorovna**, post-graduate student design and manufacture of electronic resources, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: quality and reliability of radio electronic equipment.

ББК 65.292+74.58

## ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ФРАНЧАЙЗИНГА В ВЫСШЕМ ОБРАЗОВАНИИ

© 2011 А. А. Нечитайло, С. А. Нечитайло

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

В данной статье описаны преимущества системы франчайзинга, предложены способы интеграции системы франчайзинга в высшее образование, сформированы основные преимущества системы франчайзинга в высшем образовании перед иными формами сотрудничества в высшем образовании. Франчайзинг в высшем образовании представлен как средство конкурентной борьбы и способ внедрения методов дистанционного обучения с использованием современных педагогических, информационных и телекоммуникационных технологий.

*Высшее образование, франшиза, франчайзер, франчайзи, зарубежные вузы, исключительное право, эффективные образовательные сети.*

Макроэкономический рост и благосостояние страны зависят от уровня развития базовых отраслей общественного производства. Среди них исключительно важную роль играет образование. В любом государстве образование является системообразующим фактором, а качественное образование — основой социального развития и устойчивого экономического роста. Поэтому без соответствующего реформирования и институционализации системы образования невозможно адекватное развитие производительных сил.

Нет необходимости обосновывать, что наиболее успешные и доходные предприятия на рынке, например, нефтяных продуктов (Лукойл, Роснефть, Витязи), общественного питания (Макдоналдс, Жили Были, Тинькофф) и др. - результат франчайзинговой деятельности.

Первым прототипом современной системы франчайзинга принято считать систему продаж и обслуживания [швейных машин Зингера](#). Основатель всемирно известной компании «Singer Sewing machine company» Исаак Зингер стал родоначальником современного франчайзинга. Начиная с 1851 года, фирма Зингера заключала с [дистрибьюторами](#) товара письменный договор на передачу франшизы. Договором передавалось право на продажу и ремонт швейных машинок на оп-

ределённой территории [Соединенных Штатов](#) [1].

Образно говоря, в настоящее время образование является такой же сферой рыночных отношений, как промышленность, строительство, финансово-кредитная и иные сферы. Производство образовательных услуг испытывает давление конкуренции, нуждается в рекламе и надёжных путях реализации как в нашей стране, так и за рубежом. Средством конкурентной борьбы может послужить использование образовательными учреждениями франчайзинга. Франчайзинг не только способствует увеличению количества предоставляемых образовательных услуг и повышению их качества, но и повышению интеллектуального уровня общества, обеспечивая доступ к различным уровням образования там, где оно было ранее порой недоступно.

Законодательство ни в России, ни в других странах мира не выделяет соглашение о франчайзинге в качестве особого вида договоров, таких, как, например, договор купли-продажи, договор аренды, договор подряда и т.д. Юристы обычно рассматривают этот договор как смешанную (гибридную) форму, сочетающую в себе элементы лицензионного соглашения и дистрибьюторского договора.

Несомненно, в нем есть и то, и другое, но в то же время содержание соглашения, как

правило, существенно шире, поскольку отношения между франчайзером и франчайзи намного разнообразнее. Именно это определяет весь характер и специфическую технологию взаимоотношений франчайзера и франчайзи.

Какими бы ни были различные сферы бизнеса, ведущегося на условиях франчайзинга, предметом соглашения всегда является передача прав и возможностей эффективного ведения деятельности, которыми располагает франчайзер и которые отсутствуют у франчайзи [2].

Франчайзинг является относительно новым видом вузовской деятельности. Он открывает большие возможности для развития существующего вуза, для существенного увеличения продаж его услуг на рынке. Достаточно большой опыт применения вузовского франчайзинга в странах с развитой рыночной экономикой и некоторый опыт России убедительно свидетельствует о его высокой эффективности.

Термин франчайзинг происходит от французского слова *franchise*, что означает льгота, привилегия. В сфере образования франчайзинг определяется как система продажи или передачи лицензий на образовательные программы, технологии ведения учебного процесса, товарный знак и др. Он представляет собой способ предоставления услуг, способ развития и завоевания рынка образовательных услуг на основе кооперации интеллектуальных, материальных и финансовых средств и усилий различных вузов. Франчайзинг может рассматриваться также и как соглашение, при котором вуз дает эксклюзивные права на распространение на данной территории под своим брендом образовательных услуг другим вузам в обмен на получение от них определенной оплаты при условии соблюдения всех требований передаваемого образовательного процесса.

В образовательном франчайзинге участвуют две группы вузов. Вуз, который передает другому вузу право на образовательную деятельность под своим товарным знаком и получает за это плату, называется вузом-франчайзером. Вуз, получающий от вуза-франчайзера право на деятельность под его

брендом и обязующийся соблюдать предписанные стандарты качества и методы ведения образовательного процесса, называется вузом-франчайзи.

Элитарный вуз, создающий систему франчайзинга, должен иметь не только достаточно длительный опыт работы и твердые позиции на определенном рынке образовательных услуг за счёт высокого качества своей продукции или услуг, но и создать отлаженную систему бухгалтерского учёта. Полученная в его рамках экономическая информация и статистические данные должны широко использоваться при создании пакета документов по франчайзингу. Качество полученных результатов по составлению бизнес-проекта, других финансовых документов определяется методами обработки исходных данных и их достоверностью. Это особенно касается внутренних данных бухгалтерского учёта и отчетности вуза-франчайзера [3].

Одним из основных условий франчайзингового бизнеса, и вузовского в том числе, являются обязательные отчисления (франшизная плата) вузу-владельцу торговой марки, т.е. выплата роялти вузу-франчайзеру. Согласие вуза-франчайзи на франшизную плату (роялти) за использование имени или бренда вуза-франчайзера объясняется объективными причинами: во-первых, эти реквизиты хорошо известны клиентам и потребителям и тем самым гарантируют устойчивый сбыт образовательных услуг, а во-вторых, вместе с известным названием приходит соответствующий имидж, причастным к которому становится вуз-франчайзи. Вместе с покупкой франшизы приобретаются преимущества от уже апробированной концепции ведения образовательного процесса и существующего бренда. Именно за эти преимущества вуз-франчайзи будет делиться частью прибыли и пожертвует частью своей независимости.

Особую актуальность образовательный франчайзинг приобретает в настоящее время за счёт увеличения интереса к новому направлению развития системы образования, а именно, внедрения методов интерактивного и дистанционного обучения с использованием современных педагогических, информацион-

ных и телекоммуникационных технологий. Применение образовательными учреждениями, особенно высшими, франчайзинга позволяет создавать эффективные образовательные сети с использованием интерактивных и дистанционных технологий в кратчайшие сроки, предоставляя всем желающим равный доступ к качественному образованию [4]. Нужно отметить, что при этом суммарные затраты вуза будут значительно меньше, чем при создании привычных нам филиалов университетов.

Товаром, или готовым продуктом, предоставляемым на продажу, в высшем образовании является в том числе и образовательная программа, гарантирующая достижение определенного социального эффекта (изменения образовательного или профессионального уровня). Как правило, учебное заведение предлагает на рынке комплекс услуг, объединённых единой задачей и обеспеченных соответствующими ресурсами. Яркий пример – государственный университет (ГУ) «Высшая школа экономики», имеющий образовательную сеть во многих регионах России. И это не просто платный «прокат» брэнда, а полноценный вектор работы. Татьяна Клячко (будучи в 2003 г. директором центра образовательной политики ГУ «Высшая школа экономики»), отвечая на вопросы корреспондента «Учительской газеты» И. Дёминой о специфике франчайзинговой деятельности своего вуза, отметила, что в создание и сопровождение франчайзинговой сети вкладывается очень много сил. Для них организуются специальные библиотечные фонды, готовятся кадры; туда постоянно выезжают преподаватели высшей школы экономики, читают лекции: «Здесь не просто дали имя и успокоились, идёт планомерная работа, с тем чтобы уровень преподавания был достоин материнской марки».

Сейчас в стране активно расширяется практика сотрудничества с зарубежными вузами: преподаются либо отдельные курсы (с выдачей сертификатов – так, например, Уральский государственный университет работает со стэнфордским собратом), либо организуется магистратура под эгидой, скажем, Манчестерского университета (такие дипломы выдает выпускникам Московская

высшая школа социальных и экономических наук) или Лондонской Школы экономики (ГУ «Высшая школа экономики»). Создаются центры тестирования и переподготовки, информационные службы, консультационные пункты, тренинговые компании и т.п. Это должно означать, что в образовательном учреждении есть сертифицированные программы, квалифицированные специалисты и все надлежащие условия для обучения по западным технологиям (аккредитацией и контролем качества образовательных услуг, предоставляемых вузами и их агентами за пределами своих стран, занимается международная организация GATE — Global Alliance for Transnational Education) [5]. Определённая работа в этом направлении проводится и в Самарском государственном аэрокосмическом университете.

Таким образом, используя франчайзинг, владельцы исключительных прав, а именно образовательных программ и технологий, могут продвигать их на новые рынки, в первую очередь на те, которые им по каким-то причинам ранее были недоступны. Так же и заинтересованные вузы с помощью франчайзинга могут получить высокопродвинутое образовательные программы и технологии, к которым по тем или иным причинам доступа у них не было. Передача прав может быть осуществлена с различной полнотой в разных ситуациях. Полная передача прав подразумевает право зачислять студентов для обучения по какой-либо программе, оценивать их знания, принимать экзамены и выдавать документы о соответствующем образовании и (или) квалификации. Такой «полный франчайзинг» крайне редок, обычно передаётся лишь часть прав: например, реклама новой образовательной программы и её продвижение на рынок, учебный план, учебно-методическое обеспечение, привлечение студентов или преподавателей и пр. Право на присуждение учёной степени практически никогда не отдаётся. Согласно подобным соглашениям некоторые учебные заведения продвигали свои программы туда, куда они не имели доступа, и таким образом местные жители получали возможность иметь собст-

венный (лицензионный) вариант тех программ, которые их привлекали.

В ходе работы вуз-франчайзи представляет вузу-франчайзеру отчёты о своей деятельности. Их содержание и сроки предоставления также должны быть определены при создании проектной документации по франчайзингу. В сферу бухгалтерского учёта включается проверка и анализ отчётов, поскольку содержащаяся в них информация может сигнализировать о неблагоприятных моментах в работе отдельных звеньев сети, способных оказать серьезное влияние на состояние всей системы. Это усиливает контрольные и аналитические функции системы организации учёта [6].

Необходимо также отметить, что организация франчайзингового соглашения на базе существующего вуза - предприятие куда менее затратное, нежели организованные «с нуля» всевозможные дочерние организации и филиалы вуза. Благодаря этим соглашениям региональные учебные заведения, даже не получив полный франчайзинг, способны предложить учащимся более широкий спектр высококлассных программ, которые они сами не были бы способны разработать за такие же короткие сроки. При этом всегда должно быть чётко указано, какая организация ратифицирует используемые ими (франчайзерами) образовательные программы [7]. Несомненно, налицо нижеприведённые положительные факторы образовательного франчайзинга:

1) отсутствующая необходимость в дорогостоящей аренде всевозможных помещений от гардеробных и санузлов до лабораторий и лекционных аудиторий;

2) существующий свой в вузе-франчайзере сплочённый и сработанный коллектив профессорско-преподавательского и учебно-вспомогательного персонала;

3) закупленное ранее, налаженное и обслуживаемое лабораторное и прочее оборудование (как специализированное, так и, например, ЭВМ, принтеры, всевозможные электронные сети и т.д.);

4) более «маститая» приёмная кампания и многое другое.

В конечном счёте, затратив средства на приобретение и адаптацию брендового учебно-методического комплекта документации, вуз-франчайзер выигрывает время и экономит средства по сравнению с процессом «догнать и перегнать» идущих далеко впереди.

### Библиографический список

1. Нечитайло, С. А. Франчайзинг как метод развития сферы образовательных услуг региона [Текст] / С. А. Нечитайло // Наука – промышленности и сервису: Пятая международная научно-практическая конференция 18 ноября 2010 г. / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти: Изд-во ПВГУС, 2010. – 452 с.

2. Довгань, В. В. Организационно-экономические основы системы франчайзинга как формы предпринимательства (на примере деятельности научно-производственной фирмы «Дока» г. Тольятти : дисс. ... канд. экон. наук 08.00.05: защищена 1994 / Довгань Владимир Викторович. – Москва, 1994. – 262с.

3. Ерохина, Л. И. Роялти как неотъемлемый элемент системы франчайзинга при продвижении образовательных продуктов и услуг [Текст] / Л. И. Ерохина, А. А. Нечитайло, С. А. Нечитайло // Проблемы и перспективы развития экономики и менеджмента в России и за рубежом: Материалы третьей всероссийской научно-практической конференции 21-22 апреля 2011 г. / Рубцовский индустриальный институт. – Барнаул = Рубцовск: Изд-во Алт. ун-та, 2011. – 453 с.

4. Банк работ [Электронный ресурс] Образовательный франчайзинг. - Электрон. дан. – Режим доступа [http://bankrabot.com/work/work\\_8154.html](http://bankrabot.com/work/work_8154.html), свободный. Загл. с экрана.

5. Азбука образовательного менеджмента [Электронный ресурс] Франчайзинг с педагогическим лицом ; авт. Калужская М. А. – Электрон. дан. – М. : 2005 - Режим доступа <http://upr.1september.ru/2005/19/2.htm>, свободный. Загл. с экрана.

6. Нечитайло, С. А. Организационно-экономические особенности регионального франчайзинга образовательных услуг [Текст] / С. А. Нечитайло, А. Ю. Апарина,

А. Е. Козлова // Наука и современность. - Выпуск 1: материалы международной научно-практической конференции 22 марта 2011 г. - К.: НАИРИ, 2011. - 175с.

7. Семёнова, А. С. Образовательный франчайзинг: Сущность, принципы построения

и функционирования сети: дисс. ... канд. экон. наук 08.00.05: защищена 2002 / Семёнова Анна Сергеевна ; Моск. гос. универ. экон., статистики и информатики. - Москва, 2002. - 157с.

## ORGANIZATION OF THE SYSTEM FRANCHISING IN HIGHER EDUCATION

© 2011 A. A. Nechitailo, C. A. Nechitailo

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

This article describes the advantages of franchising, suggests ways of integrating the franchise system in higher education, formed the major benefits of franchising in higher education over other forms of cooperation in higher education. Franchising in higher education is presented as a means of competition and how to implement distance learning methods with the use of modern teaching, information technology and telecommunications.

*Higher education, franchise, franchisor, franchisee, foreign universities, the exclusive right to effective educational network.*

### Информация об авторах

**Нечитайло Александр Анатольевич**, директор института печати, д. э. н., профессор, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [ip.ssau@mail.ru](mailto:ip.ssau@mail.ru). Область научных интересов: организационно-экономические механизмы управления процессами внедрения вузовских научно-технических новшеств в системе «вуз-производство-потребитель», издательское дело и книгораспространение.

**Нечитайло Сергей Александрович**, заведующий лабораторией, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [ip.ssau@mail.ru](mailto:ip.ssau@mail.ru). Область научных интересов: франчайзинговые схемы ведения бизнеса, интеграция франчайзинга в высшее образование, полиграфия и наружная реклама.

**Nechitailo Alexander Anatolevich**, director press institute, doctor of sc., professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [ip.ssau@mail.ru](mailto:ip.ssau@mail.ru). Research interests: organizational and economic mechanisms for managing the implementation process of university scientific and technological innovations in the "university-production-consumer", publishing and book distribution.

**Nechitailo Sergej Aleksandrovich**, head of the laboratory, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [ip.ssau@mail.ru](mailto:ip.ssau@mail.ru). Research interests: franchising business, franchising in the integration of higher education, printing and outdoor advertising.

ВЕСТНИК  
САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
имени академика С. П. КОРОЛЁВА  
(национального исследовательского университета)

№ 7 (31)

2011

Корректор **Карпова Л. М.**  
Компьютерная вёрстка **Малыгин Р. В., Зайцев Д. А.**  
Переводчик **Харламов В. А.**

*Каталожная цена: 1000 руб.*

---

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Тираж 200. Заказ \_\_\_\_\_

---

Отпечатано в издательстве СГАУ  
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

**Правила оформления статей для журнала  
«Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета  
имени академика С. П. Королёва  
(национального исследовательского университета)»**

1. Статья представляется в двух экземплярах, распечатанных на лазерном принтере на одной стороне бумаги в режиме качественной печати, а также в электронном виде на отдельном носителе по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34, 212а – 3А, тел.: (846) 267 48 41, электронная почта: vest@ssau.ru.

2. Текст статьи представляется в формате Microsoft Word на дискетах, CD или DVD. Объём статьи – до 10 страниц формата А4. Имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc. Поля – по 2,5 см с каждой стороны, текст – кегль 12, одинарный междустрочный интервал. Выравнивание: по ширине страницы. Шрифты – Times New Roman, Symbol. Отступ первой строки абзаца – 1 см. Страницы должны быть пронумерованы.

Замена буквы «ё» на букву «е» недопустима. Написание в тексте буквы «ё» является обязательным.

3. Допускается наличие рисунков, формул и таблиц по тексту.

Рисунки могут быть созданы средствами Microsoft Word/Excel или представлены в форматах JPEG, GIF, TIFF, PNG. Подпись к рисунку начинается со слова «Рис.» и номера по порядку, подпись располагается снизу, выравнивание – по центру. Для ссылки по тексту статьи на рисунок 1 следует использовать сокращение: рис. 1.

Для математических выражений и формул следует использовать Microsoft Equation 3.0 и буквы латинского (Times New Roman, курсив, размер 12) и греческого (Symbol, курсив, размер 12) алфавитов. Формулы, на которые в статье делаются ссылки, следует печатать с новой строки, при этом формулы нумеруются в порядке следования по тексту статьи. Номер формулы и ссылка на неё в тексте обозначается числом в круглых скобках: (1), (2), (3). Длина формулы на строке строго ограничена – до 80 мм (допускается перенос на следующие строки).

Заголовок таблицы начинается со слова «Таблица» и её номера по порядку, заголовок размещается сверху, выравнивание – по левому краю. Для ссылки по тексту статьи на таблицу 1 следует использовать сокращение: табл. 1.

4. Библиографический список оформляется отдельным разделом в конце статьи, при этом литературные источники располагаются в порядке их использования по тексту статьи в виде нумерованного списка, и оформляется в соответствии с действующим ГОСТ 7.1-2003.

5. К тексту статьи прилагается направление организации (если авторы не являются сотрудниками СГАУ), рецензия специалиста по научному направлению статьи (не являющегося сотрудником подразделения, где работают авторы), акт экспертизы, информация об авторах для опубликования в журнале. На отдельной странице указываются сведения об авторах для служебного пользования: фамилия, имя, отчество, учёная степень, учёное звание, должность, место работы, служебный и домашний адреса, телефон, электронная почта. Статья должна быть подписана всеми авторами.

6. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и сопроводительные документы не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста.

7. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Образец оформления:

УДК 536.04

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ СЛОЖНОЙ ЗАМКНУТОЙ СТРУКТУРЫ  
НА БОРТУ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ**

© 2011 Г. П. Аншаков<sup>1</sup>, В. В. Бирюк<sup>2</sup>, В. В. Васильев<sup>2</sup>, В. В. Никонов<sup>2</sup>, В. В. Салмин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС»

<sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

(аннотация статьи 50...150 слов, кегль: 10)

(ключевые слова 8-12 слов, кегль: 10, начертание: курсив)

(текст статьи)

(библиографический список)

(информация об авторах для опубликования: фамилия, имя, отчество, учёная степень, учёное звание, должность, место работы, электронная почта, область научных интересов – до 10 слов)

**THERMAL FIELDS SIMULATING OF COMPLEX CLOSED  
STRUCTURE ABOARD RESEARCH SPACE LABORATORY**

© 2011 G. P. Anshakov<sup>1</sup>, V. V. Biruk<sup>2</sup>, V. V. Vasiliev<sup>2</sup>, V. V. Nikonov<sup>2</sup>, V. V. Salmin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FSUE SRPSRC "TsSKB-Progress"

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

(аннотация статьи – на английском языке)

(ключевые слова – на английском языке)

(библиографический список – на английском языке)

(информация об авторах для опубликования – на английском языке)