

ВЕСТНИК

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

№ 7 (38)

2012

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

№ 7 (38)
2012

Главный редактор

Шахматов Е. В., д.т.н., профессор

Заместители главного редактора

Балакин В. Л., д.т.н., профессор, Прокофьев А. Б., д.т.н., профессор

Ответственный секретарь

Прохоров А. Г., к.т.н., доцент

Реакционная коллегия

Астафьев В. И., д.ф.-м.н., профессор

Кузьмичёв В. С., д.т.н., профессор

Балакин В. Л., д.т.н., профессор

Лукачёв С. В., д.т.н., профессор

Богатырев В. Д., д.э.н., профессор

Меркулова Л. П., д.п.н., профессор

Казанский Н. Л., д.т.н., профессор

Михеев В. А., д.т.н., профессор

Комаров В. А., д.т.н., профессор

Пиганов М. Н., д.т.н., профессор

Коптев А. Н., д.т.н., профессор

Прохоров С. А., д.т.н., профессор

Фалалеев С. В., д.т.н., профессор

Председатель редакционного совета

Сойфер В. А., член-корр. РАН

Редакционный совет

Аншаков Г. П., член-корр. РАН

Гречников Ф. В., член-корр. РАН

Барвинок В. А., 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 включен 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

СОДЕРЖАНИЕ

СЕТЕВЫЕ ЦИФРОВЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С ЗАКРЫТЫМ ОПТИЧЕСКИМ КАНАЛОМ <i>Г. И. Леонович, С. А. Матюнин, Р. Р. Акбаров, С. В. Ивков, Н. А. Ливочкина, А. И. Глушков</i>	9
МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ <i>С. У. Увайсов, Н. К. Юрков</i>	16
ПРАВИЛЬНАЯ НУМЕРАЦИЯ ДВУХПОЛЮСНОГО ОРИЕНТИРОВАННОГО ГРАФА <i>Д. А. Попова-Коварцева</i>	23
ВАКУУМНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ С ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ <i>А. А. Рыжов, Н. К. Юрков, А. А. Ромашин</i>	29
АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА <i>М. Н. Пиганов, В. Д. Дмитриев, С. В. Тюлевин, А. В. Кочкина</i>	35
КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ЗНАЧЕНИЙ ВЯЗКОСТИ И УРОВНЯ ЧИСТОТЫ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ <i>М. А. Ковалёв, Г. В. Бородкин</i>	40
ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ <i>Л. С. Зеленко, Д. А. Загуменнов, А. О. Зинченко</i>	46
АВТОКАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ПО ВХОДУ КАНАЛА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН <i>Л. Э. Вилоп</i>	54
РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕРИФИКАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ К УПРАВЛЯЮЩИМ АЛГОРИТМАМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ВИЗУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ <i>А. В. Шульдин, А. А. Тюгашев</i>	59
ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ПОЗИЦИОННЫХ ХАРАКТЕРСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДАТЧИКА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ <i>В. С. Тиньгаев, С. А. Матюнин, В. А. Медников</i>	67
МЕТОДИКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ <i>А. В. Наседкин, С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов</i>	76
МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СИГНАЛА АРТЕРИАЛЬНОЙ ПУЛЬСАЦИИ КРОВИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕБРАЗОВАНИЙ <i>Л. И. Калакутский, А. А. Федотов</i>	85

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ОПЫТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ НА РАННИХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ	
<i>А. В. Затылкин, Д. А. Голушко, А. В. Лысенко</i>	91
МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ КЛЕТОЧНЫХ СУСПЕНЗИЙ МЕТОДОМ БИОИМПЕДАНСОМЕТРИИ	
<i>С. А. Акулов, Р. Ю. Дорошенко</i>	97
РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВНУТРИ ОДНОРОДНЫХ КОРПУСОВ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ	
<i>А. В. Костин</i>	103
ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР НА АЛМАЗНОЙ ПЛЕНКЕ	
<i>К. Н. Тукмаков, Б. О. Володкин, М. С. Комленок, А. А. Хомич, В. С. Павельев</i>	112
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЛОПАТОК ТУРБОАГРЕГАТОВ, ОСНОВАННЫЕ НА НЕЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ПЕРВИЧНЫХ СИГНАЛОВ	
<i>А. Ж. Чернявский, А. И. Данилин, С. А. Данилин</i>	117
МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРЕ	
<i>А. В. Солнцева, Б. В. Скворцов, С. А. Борминский</i>	124
ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ	
<i>С. А. Борминский</i>	131
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ СЕТЕЙ ПЕТРИ	
<i>В. А. Зеленский, В. П. Коннов, А. И. Щодро</i>	137
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В СТАЦИОНАРНЫХ И ДВИЖУЩИХСЯ СРЕДАХ	
<i>Б. В. Скворцов, Д. Б. Скворцов, А. Н. Малышева-Стройкова</i>	143
АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА	
<i>Г. Н. Князева, Г.Ф. Краснощёкова, С. В. Тюлевин</i>	152
УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ СТАБИЛИТРОНОВ	
<i>С. В. Тюлевин, И. Н. Козлова, Г. П. Шопин, А. И. Архипов</i>	156
ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ТЕПЛОВИЗОРА СОХ СХ – 320U	
<i>И. Е. Давыдов, А. Н. Агафонов</i>	161

**ФИНИШНЫЕ ПОКРЫТИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В ПРОМЫШЛЕННЫХ
ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОИЗВОДСТВА СОВРЕМЕННОЙ АППАРАТУРЫ**

Ю. П. Ерендеев

166

**ВНЕДРЕНИЕ МУЛЬТИ - И ГИПЕРМЕДИА ПОСОБИЙ КАК
ИННОВАЦИОННЫЙ ПУТЬ СОЗДАНИЯ НОВЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ
ПРИ ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ И ТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА
ПРОИЗВОДСТВА И СФЕРЫ УСЛУГ**

А. А. Нечитайло, С. А. Нечитайло

178

**БИНАРНЫЙ ОПТОМЕХАНИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО
ТИПА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И КОНТРОЛЯ**

Д. В. Корбан

183

CONTENTS

NETWORK DIGITAL FIBER-OPTIC DISPLACEMENT SENSORS WITH CLOSED OPTICAL NETWORK DIGITAL FIBER-OPTIC DISPLACEMENT SENSORS WITH CLOSED OPTICAL CHANNEL <i>G. I. Leonovich, S. A. Matjunin, R. R. Akbarov, S. V. Ivkov</i>	9
THE METHOD OF PROVIDING HEAT TRACEABILITY OF WIRELESS DEVICES AT THE STAGE OF PROJECT <i>S. U. Uvaysov, N. K. Yurkov</i>	16
CORRECT NUMERING OF TWO-POLE DIRECTED GRAPHS <i>D. A. Popova-Kovartseva</i>	23
VACUUM CAPACITORS WITH HIGH TEMPERATURE STABILITY <i>A. A. Ryzhov, N. K. Jurkov, A. A. Romashin</i>	29
ANALYSIS AND MODELING OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF THE TUNNEL DIODE <i>M. N. Piganov, V. D. Dmitriev, S. V. Tyulevin, A. V. Kochkina</i>	35
CONTROL OF THE AIRCRAFT HYDRAULIC SYSTEM TECHNICAL CONDITIONS ON THE BASIS OF MONITORING VISCIDITY VALUES AND PURITY LEVEL OF FLUID POWER <i>M. M. Kovalev, G. V. Borodkin</i>	40
BUILDING FOUNDATIONS OF VIRTUAL INFORMATION-BASED EDUCATIONAL ENVIRONMENT <i>L. S. Zelenko, D. A. Zagumennov, A. O. Zinchenko</i>	46
AUTOCALIBRATION MEASURING CHANNEL ON THE INPUT CHANNEL CONVERSION ELECTRIC VALUES <i>L. E. Vilop</i>	54
REAL-TIME CONTROL ALGORITHMS REQUIREMENTS VERIFICATION MATHEMATICAL MODEL IMPLEMENTATION IN VISUAL DESIGN COMPUTER-AIDED SYSTEM <i>A. V. Shulyndin</i>	59
OPTIMIZATION OF MODEL POSITIONAL CHARACTERISTICS OF THE ELECTROMAGNETIC SENSOR OF THE LINEAR PEREMESHCHNY <i>V. S. Tingaev, S. A. Matyunin, V. A. Mednikov</i>	67
METHOD OF PRODUCTION TESTING OF ELECTRONIC PARTS <i>A. V. Nasedkin, S. V. Tyulevin, M. N. Piganov</i>	76
DISTAL ARTERIAL PULSE SIGNAL PROCESSING METHOD BASED ON WAVELET TRANSFORMS <i>L. I. Kalakutskiy, A. A. Fedotov</i>	85

RESEARCH METHODOLOGY OF RADIO ELECTRONIC DEVELOPMENT OF EARLY THEORETICAL METHODS IN THE DESIGN	
<i>A. V. Zatylnkin, D. A. Golushko, A. V. Lysenko</i>	91
CELL SUSPENSIONS STATUS MONITORING BY BIOIMPEDANCE METHOD	
<i>S. A. Akulov, R. J. Doroshenko</i>	97
CALCULATION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD IN HOMOGENEOUS HULL OF ON BOARD EQUIPMENT OF SPACE VEHICLE UNDER INFLUENCE OF ELECTROSTATIC DISCHARGES	
<i>A.V. Kostin</i>	103
DIAMOND FILM BASED PHOTONIC CRYSTAL RESONATOR	
<i>K. N. Tukmakov, B. O. Volodkin, M. S. Komlenok, V. S. Pavelyev, A. A. Khomich</i>	112
PARAMETERS TRANSDUCERS OF THE BLADE'S DYNAMIC MOVEMENTS OF TURBOUNITS BASED ON NONLINEAR APPROXIMATION OF PRIMARY SIGNALS	
<i>A. Zh. Chernyavskiy, A. I. Danilin, S. A. Danilin</i>	117
METHOD TO IMPROVE ACCURACY MASS MEASUREMENT FLUID IN THE TANK	
<i>A. V. Solntseva, B. V. Skvortsov, S. A. Borminsky</i>	124
MEASUREMENT OF HYDROCARBON FUELS QUALITY FACTOR. PRECISION INCREASE	
<i>S. A. Borminsky</i>	131
SIMULATION OF OPERAITING CYCLE BY PETRY NETS	
<i>V. A. Zelenskiy, V. P. Konnov, A. I. Schodro</i>	137
THEORETICAL BASIS OF DIRECTED ENERGY TRANSMISSION PULSES IN STATIONARY AND MOVING MEDIA	
<i>B. V. Skvortsov, D. B. Skvortsov, A. N. Malysheva – Strojko</i>	143
ANALYSIS OF MODELS OF FUEL ELEMENTS WHILE USING OF SURFACE MOUNTING	
<i>G. N. Knyazeva, G. F. Krasnoshchekova</i>	152
CONTROL DEVICE ZENER DIODE	
<i>S. V. Tyulevin, I. N. Kozlova, G. P. Shopin, A. I. Arkhipov</i>	156
THERMAL MEDICAL SOFTWARE HARDWARE-BASED THERMAL IMAGER COX CX - 320U	
<i>I. E. Davydov, A. N. Agafonov</i>	161
THIN COATING FOR PRINTED CIRCUIT BOARDS IN INDUSTRIAL PRODUCTION TECHNOLOGY OF MODERN EQUIPMENT	
<i>J. P. Erendeev</i>	166

**IMPLEMENTATION OF MULTI- AND HYPERMEDIA AS AN
INNOVATIVE WAY OF CREATING NEW COMPETENCY IN TEACHING
STUDENTS AND TECHNICIANS MANUFACTURING AND SERVICES**

A. A. Nechitailo, S. A. Nechitailo

178

**DIFFERENTIAL BINARY OPTICAL-MECHANICAL SENSORS
FOR AUTOMATED MANAGEMENT AND CONTROL SYSTEMS**

D. V. Korban

183

СЕТЕВЫЕ ЦИФРОВЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С ЗАКРЫТЫМ ОПТИЧЕСКИМ КАНАЛОМ

© 2012 Г. И. Леонович¹, С. А. Матюнин², Р. Р. Акбаров³, С. В. Ивков³,
Н. А. Ливочкина³, А. И. Глушков²

¹Секция прикладных проблем при Президиуме РАН

²Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

³ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

Предложены принципы построения, структурные схемы и алгоритмы функционирования цифровых волоконно-оптических датчиков перемещения с закрытым оптическим каналом, характеризующихся высокой надежностью и простотой интегрирования в пассивную сенсорную сеть.

Пассивная волоконно-оптическая сенсорная сеть, внутриволоконная Брэгговская решетка, сенсорное покрытие, цифровые волоконно-оптические датчики перемещения с закрытым оптическим каналом.

Введение

Пассивные волоконно-оптические сенсорные сети (ПВОСС) в ближайшие 10 лет на 80...90% покроют потребности аэрокосмической и оборонной отраслей [1-4]. Главное достоинство ПВОСС – легко реализуемое встраивание компонентов сети непосредственно в несущие конструкции, поворотные и деформируемые плоскости, силовые агрегаты и наружные элементы контрольно-измерительной аппаратуры. Этому содействуют такие качества ПВОСС, как сверхмалые массогабаритные показатели, высокая устойчивость к дестабилизирующим факторам и активным средам, долговечность. Активно внедряет и инвестирует в ПВОСС военно-промышленный комплекс США и Западной Европы. В частности, в аналитическом обзоре исследовательской технологической организации НАТО (RTO NATO) особое внимание уделено разработке и прогнозу использования волоконно-оптических датчиков (ВОД) и бортовых сенсорных сетей на основе Брэгговских решеток [1]. В числе основных поставщиков сетевого и сенсорного оборудования - компании Elcis, Leine&Linde, M.C.B., Tamagawa Seiki, Sony, Siemens, TM, Megetron, Motorola, IEI Technology, Fraba Posital, Kuebler, Omron, Pepperl+Fuchs, Heidenhain и др.

В настоящее время наблюдается дефицит ВОД угловых и линейных перемещений с закрытым оптическим каналом (ЗОК), не предложено ни одного комплексного решения задачи создания ПВОСС с универсальным протоколом сбора и обработки данных, в зачаточном состоянии целый сектор гибридных датчиков, построенных на принципах взаимодействия сенсорных покрытий с сопряженным с ними оптическим волокном (ОВ). В статье приведен анализ ряда теоретических и экспериментальных результатов, которые могут стать основой для создания широкой номенклатуры цифровых ВОД ЗОК перемещения для ПВОСС.

Чувствительные элементы и покрытия

Наиболее распространенным, универсальным и эффективным чувствительным элементом интегрированных ВОД считается формируемая в сердцевине ОВ внутриволоконная Брэгговская решетка (ВБР) [1-4]. ВБР представляет собой участок ОВ длиной $L_{BG}=0,3...3$ см, в котором показатель преломления сердцевины n_0 промодулирован в продольном направлении с пространственным периодом $L=300...600$ нм и глубиной модуляции $\delta n_0=10^{-3}...10^{-4}$ (рис. 1). Можно создать ВБР с потерями $\leq 0,1$ дБ, с точностью $\pm 0,05$ нм и высоким подавлением помех соседнего кана-

ла (≥ 40 дБ). Для низшей пространственной моды структура представляет собой спектрально-селективное зеркало с коэффициентом отражения K_0 на резонансной длине волны $I_{BG0} = 2n_0 \Lambda$. За счет увеличения числа «штрихов» решетки до $N_{BG} = 10^3 \dots 10^4$ значение $K_{0max}(I) \gg 1$.

Смещение λ_{BG} , используемое для со-

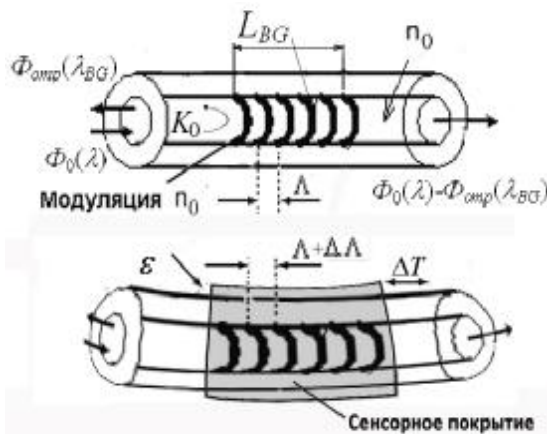


Рис. 1. Внутриволоконная решетка Брэгга

здания встроенных сенсоров, зависит от температуры световода и от приложенных к нему механических растягивающих или сжимающих напряжений [4]:

$$\Delta I_{BG} = 2n_0 \Lambda \left\{ 1 - \left(\frac{n_0^2}{2} \right) [r_{12} - n(r_{11} + r_{12})] \right\} e + \left[a + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \right] \Delta T, \quad (1)$$

где ΔT - изменение температуры; ϵ - приложенное механическое напряжение; r_{ij} - коэффициенты упругооптического тензора; ν - коэффициент Пуассона; α - коэффициент теплового расширения кварцевого стекла.

Типичные значения сдвига $\Delta \lambda_{BG}(\Delta T)$ составляют $\sim 0,01$ нм/К от относительного удлинения сенсорного участка световода $\sim 10^3 \times \Delta L_{BG} / L_{BG}$ нм. Современные измерительные средства позволяют определить λ_{BG} и $\Delta \lambda_{BG}$ с точностью до долей нм при измерении $\Delta L_{BG}(x)$ и $\Delta n_0(x)$ при различных внешних воздействиях x на участок L_{BG} . К неоспоримым достоинствам ВОД на ВБР можно отнести малые размеры и массу, универсальность, химическую стойкость, возможность создания сенсорных сетей. Недостатки – пока ограниченный перечень измеряемых пара-

метров, связанный с зачаточным состоянием развития промежуточных сенсорных элементов и покрытий ОБ, основанных на преобразовании измеряемого параметра x в механическое напряжение и/или температуру (рис. 1).

Другие эффекты, предлагаемые, в частности, для измерения перемещения и давления: 1) возбуждение и смещение мод при микроизгибах по большому радиусу ($R > 10$ мм) и 2) потери в ОБ при макроизгибах по малому радиусу ($R \approx 1 \dots 10$ мм). В первом варианте используется зависимость выходной мощности возбуждаемых и смещаемых мод от изгиба ОБ с амплитудой до 1 мм при длине сенсорного участка 1 см. Во втором случае, по аналогии с туннельным прохождением частиц через потенциальный барьер, разность коэффициентов преломления сердцевины и оболочки трактуется как «высота барьера» [6]. При изгибе с малым радиусом имеет место понижение этого барьера, и в результате увеличивается вероятность выхода излучения из сердцевины в оболочку.

Потери мощности сигнала в децибелах на изгибе вычисляют по формуле [6]:

$$A = 10 \lg \left(\frac{J}{J_0} \right) = \frac{5j R \lg e}{2\sqrt{rR}} P_D, \quad (2)$$

где J, J_0 – интенсивность поля при изогнутом и прямом волокне соответственно; j – угол изгиба; r – радиус сердцевины; R – радиус изгиба; P_D – вероятность туннельного перехода через барьер.

Из (2) следует, что потери прямо пропорциональны длине изогнутого участка волокна и возрастают с уменьшением радиуса кривизны до 4 дБ и более. Достоинство эффекта - простота реализации точечных и распределенных датчиков, построенных на измерении амплитуды оптического сигнала. Недостатки сенсоров с подвижным ОБ – ограниченное число пространственных эволюций при больших динамических нагрузках на сенсорный участок ОБ, а также связанная с механическими микрповреждениями деградация ОБ и нестабильность результатов. Вместе с тем, при фиксированных изгибах ОБ, открываются возможности не только для вывода, но и для ввода светового излучения

от источника, включенного в измеряемую электрическую схему с цифровым выходом [7].

К числу перспективных составляющих пассивных ВОД относятся гибридные сенсоры, в первую очередь интегрально-оптические (ГИОС) [8-10]. ГИОС в общем случае представляет собой составной чувствительно-кондуцирующий элемент, в котором сопряжены два типа преобразователей – химический и физический. Химический сенсор состоит из слоя чувствительного материала, который формирует селективный отклик на определяемый компонент. Физический преобразователь – трансдьюсер - преобразует энергию, которая возникает в ходе реакции селективного слоя с измеряемым воздействием (компонентом), в модулированный по определенным параметрам оптический сигнал.

Для повышения избирательности и расширения динамического диапазона используются селективно-кондуцирующие слои (ионообменные, гидрофобные, фотохромные и другие пленки). В зависимости от типа ГИОС их действие основано на принципах поглощения и отражения света, люминесценции, изменения объема, деформации и др. [1-4, 7-9].

До 70% бортовых датчиков КА и ЛА являются преобразователями угловых и линейных перемещений. Причем, в первую очередь востребованы датчики с цифровым выходом, устойчиво работающие в жестких условиях эксплуатации. Практически все известные цифровые ВОД перемещения построены по схеме с открытым оптическим каналом. Одним из перспективных направлений для создания цифровых ВОДЗОК перемещения является использование ГИОС. В работе [10] описан принцип построения ВОД давления, основанный на кондуцирующем эффекте слоя из алифатического полиуретана со сферическими наночастицами двуокиси кремния толщиной 10...1000 нм. Такое покрытие дает 5...40-кратное увеличение динамического диапазона и чувствительности датчика к механическому и ультразвуковому воздействию. Перемещающийся источник воздействия, закрепленный на объекте изме-

рения, открывает возможности для построения на базе подобного и других кондуцирующих ГИОС различных типов ЦВОДЗОК.

Цифровые ВОД перемещения с закрытым оптическим каналом

В большинстве ПВОСС используется импульсный источник излучения на основе полупроводниковых лазеров или светодиодов. Для получения пространственного, временного или волнового распределения кодовых импульсов, количество, амплитуда и взаимное расположение которых коррелирует с измеряемой величиной, можно использовать оптические линии задержки и профилированные ГИОС.

На рис. 2, а в качестве примера показана структурная схема ЦВОДЗОК для преобразования линейного перемещения в оптический последовательный двоичный код.

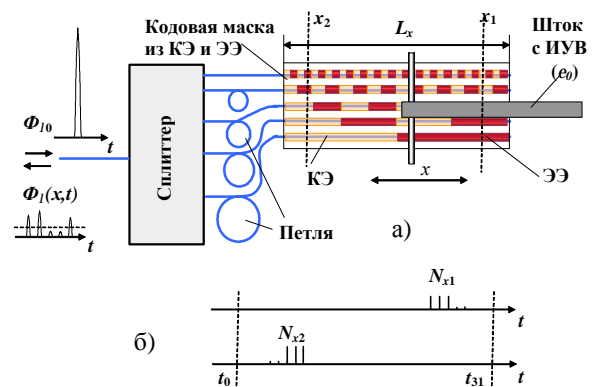


Рис. 2. Цифровой волоконно-оптический датчик линейного перемещения с закрытым оптическим каналом ($m=5$)

За основу ВОД берется оптический разветвитель (сплиттер) и отрезки ОВ, число m которых равно разрядности цифрового кода. На ОВ накладывается кодовая маска, выполненная из набора экранирующих ЭЭ и кондуцирующих КЭ элементов. Рисунок ВБР совпадает с рисунком шкалы, т.е. решетки наносятся под КЭ. Перемещающийся штوك снабжен источником управляющего воздействия ИУВ (e_0), например, нажимным выступом, ширина которого равнозначна участку ОВ с $N_{BC} \approx 10^3$ штрихами.

В датчике используется эффект отражения узкополосного оптического импульса

от деформируемого участка ОВ со смещенной ВБР, брэгговская длина волны L_{BG} которой связана с центральной длиной волны источника излучения L_{III} соотношением (1) таким образом, что длина волны отраженного сигнала равна

$$I_o = \begin{cases} I_{BG} \neq I_{III} & \text{при } e \ll e_0 \\ I_{BG} + \Delta L_{BG} = I_{BG0} = I_{III} & \text{при } e = e_0 \end{cases}, \quad (3)$$

где значения e определяются профилем кодовой маски.

С целью временного разделения разрядных каналов задержка отраженного импульса в ОВ под i -м КЭ k -й дорожки шкалы плавно варьируется в пределах элемента и всей шкалы в соответствии с алгоритмом

$$\Delta L_{ik} = 2 \left[\left(\frac{L_{k0}}{c} + (i-1) \rightarrow i \right) \left(\frac{L_x}{v2^k} \right) \right], \quad i=2,4,6,\dots,2^k, \quad (4)$$

где L_{k0} – длина согласующей петли ОВ для k -й разрядной дорожки; L_x – диапазон перемещения, равный длине чувствительного участка ВОД; c – скорость распространения импульса в ОВ.

Согласующие петли выполняют функцию упорядоченного сдвига импульсов разрядных дорожек, как показано на рис. 2, б. В частности, длины петель могут выбираться из соотношения

$$L_{k0} = \frac{M(k-1)L_x}{2^{k-1}}, \quad (5)$$

где M – масштабирующий коэффициент, значение которого определяется длительностью импульса, дисперсионными явлениями, инерционностью фотоприемного устройства и электронных компонентов ЭБ.

На рис. 3 показана структурная схема цифрового волоконно-оптического преобразователя линейного перемещения с закрытым оптическим каналом, работающего как на прямой, так и на отраженной волне.

Датчик представляет собой изогнутый по топологии кодирующих дорожек световод с сенсорным покрытием, выполненным в форме цифровой шкалы по аналогии с предыдущим примером. В таком ВОД реализуется управление оптическим бюджетом в соответствии с алгоритмом цифровой амплитудной модуляции. При экранировании управляющего воздействия (УВ) участка ОВ

под ЭЭ имеют коэффициент пропускания $\tau = \tau_0 \approx 1$ (затухание $A \approx 0$), а при наличии КЭ $t_i = t_0 - 2^i \Delta t$, где i – номер разрядной дорожки, Δt – квант дискретизации пропускания.

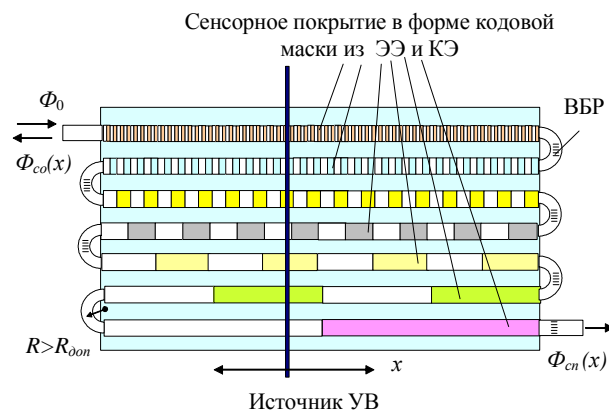


Рис. 3. ВОД линейного перемещения с амплитудной цифровой модуляцией оптического сигнала

Формированием разделительных ВБР реализуется дополнительное разделение каналов по длине волны, способствующее снижению требований к точности выдерживания значения e_0 . Снижению инструментальной погрешности датчика способствуют выполнение маски в соответствии с кодом Грея, увеличение длины участка ОВ с ВБР относительно длины кодирующего элемента, нанесение ВБР с девиацией периода L , а также применение сенсорно-кондуцирующих покрытий, фокусирующих воздействие на центр основания КЭ, сопряженного с ОВ. Достижение высокой разрешающей способности при превышении длины участков с ВБР ($L_{BG} = 0,3...3$ мм) длины кодирующих элементов шкалы ($L_{BG} > \Delta L_{ik}$) осуществляется формированием нониусных шкал с редуцией кванта измерения перемещения и реализацией других известных способов.

В простейшем накапливающем датчике количество квантованных дорожек уменьшается до двух. При этом за счет взаимного смещения дорожек с квантами шириной $a_0/2$ по координате перемещения x на величину $a_0/4$ (a_0 – период квантования) реализуется алгоритм формирования кода перемещения и его направления.

Пассивные сенсорные сети на цифровых ВОД перемещения с закрытым оптическим каналом

При проектировании ПВОСС под конкретный объект необходим комплексный подход к решению нескольких задач, связанных со следующими основными факторами: количество и места расположения точек и групп учета (съема данных); место расположения устройства сбора и обработки информации (электронного блока); кратность резервирования датчиков и каналов передачи информации; объем информации; период опроса и допустимая задержка получения конечной информации.

На рис. 4 представлен пример топологии ПВОСС, построенной на однотипных рефлектометрических датчиках, инициируемых импульсным источником излучения, и соответствующий оптический бюджет сети.

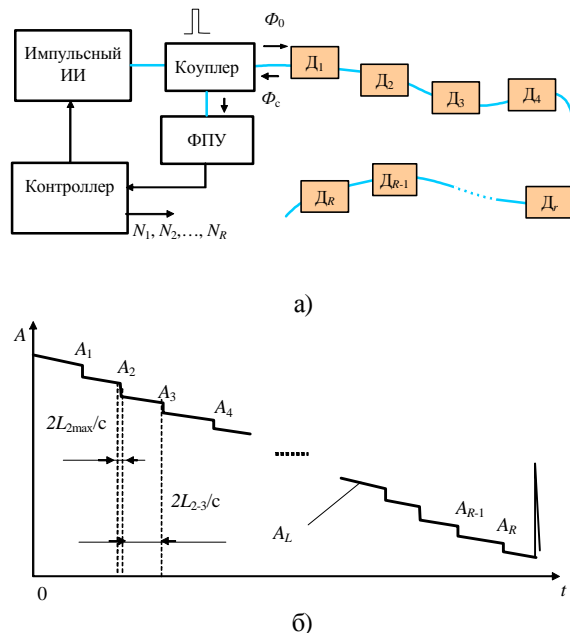


Рис. 4. ПВОСС на рефлектометрических датчиках (а) и оптический бюджет сети (б)

Минимальное затухание $A_{\min} = A_L$ имеет место, когда коды во всех R датчиках равны нулю, максимальное (которое используется для расчетов) - при максимальных значениях всех кодов N_r . Оптический бюджет рассчитывается исходя из 2...3-кратного превышения разрядным импульсом с максимальным затуханием $\max(A_{ikr})$ порогового значения $A_{\text{пор}}$, определяемого затуханием в линии, шумами, эксплуатационными темпе-

ратурными и деформирующими девиациями (вибрации, ускорения, перепады давления и т.п.):

$$A_{\Sigma} = \sum_r \sum_k \sum_i \max(A_{rki}) + \sum_s A_{\text{cmm}s} + A_L, \quad (6)$$

где $A_{\text{cmm}s}$ - затухание в соединениях s -го сплиттера с ВОД и ОВ (в общем случае s^2k); A_L - затухание в сетевом ОВ.

Временной бюджет рассчитывается в соответствии с выражением

$$T_{\Sigma} = \frac{2L}{c} + \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K \max\left(\frac{2L_{rk}}{c}\right), \quad (7)$$

где L_{rk} - длина участка ОВ, задействованного в k -й разрядной дорожке r -го датчика.

Спектральный бюджет определяется как

$$\Delta I_{\Sigma} = \sum_r \Delta I_r = \sum_r \sum_k (\Delta I_{BGrk} + \Delta I_{srk}), \quad (8)$$

где ΔI_{srk} - защитный интервал между каналами.

Библиографический список

1. Lance R.W., Parker A. R., Ko W.L., Pizazza A., Chan P. Application of Fiber Optic Instrumentation [Электронный ресурс]. – <http://www.rto.nato.int>
2. Shoenfett N.M. Fiber optic sensors for the military [Электронный ресурс]. – <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/>
3. Optical Fiber Sensors Guide. Fundamentals & Applications [Электронный ресурс]. – <http://www.micronoptics.com/uploads/library/documents/Micron%20Optics%20Optical%20Sensing%20Guide.pdf>
4. Reutlinger A., Glier M., Zuknik K.-H., Hoffmann L., Müller M., Rapp S., Kurvin C., Ernst T., McKenzie I., Karafolas N. Fiber optic sensing for telecommunication satellites [Электронный ресурс]. – http://www.llb.mw.tum.de/download/papers/abstracts/2008_rapp_ofs.pdf
5. Аксенов, В.А., Волошин, В.В., Воробьев, И.Л. и др. Потери в одномодовых волоконных световодах при однократных изгибах по малому радиусу. Прямоугольный профиль показателя преломления [Электронный ресурс] // Р.Э. – 2004. – Т. 49, № 6. – С. 734–742.
6. Устройства ввода-вывода сигнала на изгибе волокна. [Электронный ресурс]. – <http://tkc.by/ru/products/product-162.html>

7. El-Sherif M., Bansal L., Yuan J. Fiber Optic Sensors for Detection of Toxic and Biological Threats [Электронный ресурс]. – <http://www.mdpi.org/sensors>

8. Smart Polymeric Coatings—Recent Advances / Advances in Polymer Technology, Vol. 26, No. 1, 1–13 (2007)

9. Cherpak V. Fiber-optic sensors based on conductive polymers. [Электронный ресурс]. – <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5423404&url=http%3A%2F%2Fieeexplore>

[re.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5423404](http://ieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5423404)

10. Леонович, Г. И. Волоконно-оптический датчик давления для системы управления двигателем БПЛА [Текст]. / Г. И. Леонович, С. А. Матюнин, А. И. Глушков, Н. А. Ливочкина, В. И. Соловьев / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета), 2011. - №3. -Ч. 3. -С. 397-402.

NETWORK DIGITAL FIBER-OPTIC DISPLACEMENT SENSORS WITH CLOSED OPTICAL CHANNEL OPTICAL NETWORK DIGITAL FIBER-OPTIC DISPLACEMENT SENSORS WITH CLOSED OPTICAL CHANNEL

© 2012 G. I. Leonovich¹, S. A. Matjunin², R. R. Akbarov³, S. V. Ivkov³,
N. A. Livochkina³, A. I. Glushkov²

¹Section of applied problems of the RAS Presidium

²Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

³FSUE SRPSRC «TsSKB-Progress»

The principle of construction, block diagrams and operation algorithms in digital fiber-optic displacement sensors with a closed optical channel, characterized by high reliability and ease of integration into the passive sensor network.

Passive fiber-optic sensor network, fiber Bragg grating, touch coating, digital fiber optic displacement sensors with a closed optical channel.

Информация об авторах

Леонович Георгий Иванович, доктор технических наук, профессор, начальник Поволжского отделения, секция прикладных проблем при Президиуме РАН. E-mail: leogil@mail.ru. Область научных интересов: системы управления, информационно-измерительные устройства и системы.

Матюнин Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электронные системы и устройства», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: S.A.Matyunin@yandex.ru. Область научных интересов: системы управления, информационно-измерительные устройства и системы.

Акбаров Руслан Рустамович, аспирант, Самарский государственный университет. Область научных интересов: информационно-измерительные системы.

Ивков Сергей Валерьевич, инженер, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Область научных интересов: информационно-измерительные устройства.

Ливочкина Наталья Александровна, инженер, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Область научных интересов: теплотехнические измерения.

Глушков Артем Иванович, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: теплотехнические измерения.

Leonovich Georgiy Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, head of the Volga Department, Section of Applied Problems of the Presidium of the Russian Academy of Sciences. E-mail: leogi1@mail.ru. Area of scientific: control systems, information-measuring devices and systems.

Matjunin Sergey Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor, head of the "Electronic Systems and Devices", Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: S.A.Matyunin@yandex.ru. Area of scientific: control systems, information-measuring devices and systems.

Akbarov Ruslan Rustamovich, post-graduate student, Samara State University. Area of scientific: information and measurement systems.

Ivkov Sergey Valeryevich, engineer, FSUE SRPSRC «TsSKB-Progress». Area of scientific: information-measuring devices.

Livochkina Natalia Aleksandrovna, engineer, FSUE SRPSRC «TsSKB-Progress». Area of scientific: measurement of thermal engineering.

Glushkov Artem Ivanovich, graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of scientific: measurement of thermal engineering.

УДК 517.958:52/59+621.396.68

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

© 2012 С. У. Увайсов¹, Н. К. Юрков²

¹Московский институт электроники и математики национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

²Пензенский государственный университет

В статье предложена методика обеспечения тепловой контролепригодности радиотехнических устройств на этапе проектирования. Показаны результаты численных экспериментальных исследований радиотехнической аппаратуры по тепловому полю на примере блока питания БП641. Анализ полученных результатов показывает, что предложенное программное обеспечение выявляет производственные дефекты достоверно.

Тепловое поле, неразрушающая диагностика, радиотехнические устройства, производственные дефекты.

Введение

В настоящее время решение задач диагностирования радиотехнических устройств (РТУ) выходит на новый качественный уровень из-за мощного развития двух направлений, которые активно используются в задачах диагностирования. Первое – это появление мощной вычислительной техники, позволяющей решать сложные задачи моделирования. Второе – технические средства измерения (тепловизионные технологии), которые возможно сопрягать с вычислительной техникой, оперативно получая точные результаты измерения.

Таким образом, процесс диагностирования переживает качественно новый скачок, что выражается в совместном использовании современных технических средств измерения (чувствительные тепловизионные камеры совместно с компьютером) и применении мощных программ моделирования.

Роль методов термографии в диагностировании РТУ

Любое РТУ, имея на входе $X(t)$ с влиянием внешних факторов $Z(t)$ преобразует их в выход $Y(t)$. Преобразование осуществляется с помощью функции преобразования $f(X(t), q_i \in Q) = Y(t)$,

где q_i - параметр устройства со своими верхним q_i^g и q_i^h нижним допусками из множества $Q_{\text{норм}}$ - электрических, геометрических, теплофизических, физических и др. параметров. Причем, $q[Z(t)] = \text{var} = Q_{\text{норм}}$. Если параметр $q_i \notin [q_i^h, q_i^g]$, то РТУ неисправно.

Сейчас используются разнообразные методы диагностирования (электрический, функциональный, визуальный, рентгеноскопический и др.), но имеются такие производственные дефекты $Q_{\text{пр}}$, которые известными методами не выявляются.

Эти дефекты, как правило, оказывают влияние на температуру элементов РТУ, следовательно, их можно выявлять по значению температуры.

Среди всех методов диагностирования тепловые методы (или методы термографии) занимают особое положение. До 95% всех форм энергии в РТУ, в конечном счете, превращается в тепловую энергию. Любое отклонение теплофизических и геометрических параметров материалов конструкции от номинальных значений, а также изменение электрического режима работы РТУ, обусловленное отклонением параметра какого-либо элемента от номинала, приводит к изменению температурного поля РТУ [1].

Таким образом, для выявления производственных дефектов в РТУ применение методов термографии весьма актуально.

Методика обеспечения тепловой контролепригодности

На основе существующего метода теплового диагностирования РТУ разработан программный комплекс теплового диагностирования (ПКТД), подробно рассмотренный в [2]. Для обеспечения его эффективной работы (решение задачи обеспечения тепловой контролепригодности РТУ) нами предлагается методика, блок-схема которой представлена на рис. 1. Содержание блоков следующее.

Блок 1. Запуск программы моделирования. Построение в ней математической модели диагностируемого РТУ. Используется руководство пользователя для программы моделирования и техническая документация РТУ. Сохранение описания построенной математической модели в текстовый файл.

Блок 3. Запуск программного комплекса теплового диагностирования (ПКТД). Выбор в меню-создание «составляющих конечного автомата (КА)». Формирование составляющих КА, ориентированных на структуру выходного файла используемой программы моделирования. Сохранение созданных составляющих выполняется в том случае, если для используемой программы моделирования не сформированы составляющие КА.

Блок 4. Загрузка составляющих КА в ПКТД. Настройка ПКТД на автоматическую загрузку составляющих КА в пункте меню «настройка».

Блок 5. Составление списка неисправностей, которые возможны в данном РТУ и описаны в базе производственных дефектов. Загрузка в ПКТД текстового файла, описывающего математическую модель. Запуск КА. Назначение типов электрорадиоэлементов (ЭРЭ) для каждого ЭРЭ РТУ. Запуск автоматизированного формирования «списка дефектов», свойственных данному РТУ.

Блок 6. На основе разброса теплофизических параметров используемых материалов и геометрических параметров элементов конструкции проводится расчет предельно допустимых значений температур ЭРЭ по методу

Монте-Карло. Ввод в ПКТД для всех ЭРЭ РТУ полученных допусков на значение температуры.

Блок 7. Ввод в ПКТД для всех ЭРЭ, которые попали в «список дефектов», значений надежности и коэффициента тепловой нагрузки. Ввод ограничения на количество контрольных точек, если оно имеется. Запуск автоматизированного формирования «списка контрольных точек».

Блок 8. Запуск моделирования тепловых процессов РТУ в исправном состоянии и получение термограммы со значениями температур в контрольных точках.

Блок 9. Подключение опытного образца к стенду (ввод образца в рабочий режим). После выхода теплового поля РТУ на стационарный режим выполняется измерение температур в нескольких контрольных точках.

Блок 10. Уточнение тепловой модели проводится следующим образом. Сравнение измеренных значений температуры со значениями, полученными при моделировании. На основе полученных расхождений выполняется уточнение параметров математической модели.

Блок 11. Повторение операций, описанных в блоке №7 и в блоке №8.

Блоки 13,14. Внесение в конструкцию опытного образца дефекта из «списка дефектов», этот же дефект вносится в математическую модель РТУ путем внесения соответствующего изменения параметра.

Блок 15. Моделирование тепловых процессов РТУ, используя измененную математическую модель (в неисправном состоянии). Получение соответствующей термограммы со значениями температур в контрольных точках.

Блок 16. Выполнение аналогичных действий с дефектным образцом, описанных в блоке №8.

Блок 17. Устранение внесенного в конструкцию опытного образца дефекта. Устранение внесенного в математическую модель РТУ изменения, соответствующего дефекту.

Блок 18. Ввод пути, где располагается программа моделирования и указание соответствующих ей составляющих КА.

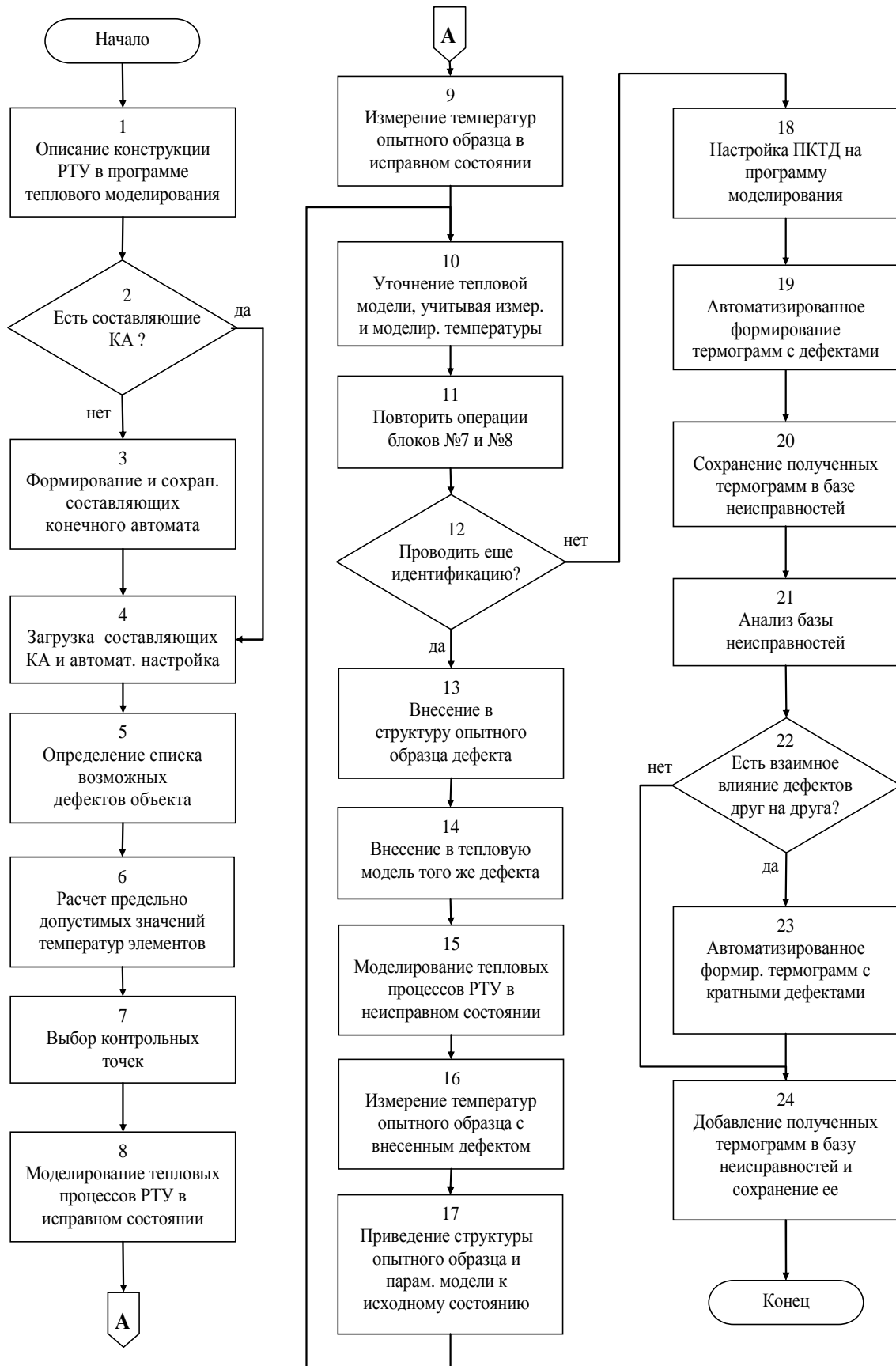


Рис. 1. Блок-схема методики обеспечения тепловой контролепригодности РТУ на этапе проектирования

Блок 19. Запуск автоматизированного формирования термограмм с дефектами путем моделирования тепловых процессов РТУ (при заданных данных, описанных в методике выше).

Блок 20. Сохранение полученных термограмм в базе неисправностей для данного типа РТУ.

Блок 21. Запуск анализа базы неисправностей на наличие причинно-следственных связей. Получение списка причинно-следственных связей. Сохранение списка в базе. Определение списка кратных дефектов, которые оказывают влияние друг на друга.

Блок 23. Запуск автоматизированного формирования термограмм с кратными дефектами по полученному списку в блоке №21.

Блок 24. Добавление полученных термограмм в базу неисправностей. Сохранение расширенной базы неисправностей.

При формировании составляющих КА необходимо иметь описание структуры входного файла программы моделирования.

Экспериментальное подтверждение эффективности разработанной методики

Численные экспериментальные исследования проводятся на блоке питания БП641. При построении тепловой модели функциональную ячейку разбиваем на компоненты. Блок состоит из двух печатных узлов и рамы-радиатора.

В результате моделирования печатного узла ТЮ5-087-780 была получена термограмма (рис. 2).

После внесения производственного дефекта (отсутствие пасты в ЭРЭ V10) в печатный узел ТЮ5-087-780 произведено измерение значений температуры в контрольных точках. В результате чего получили следующее множество температур (Табл. 1).

Заносим полученные значения температуры в программный комплекс теплового диагностирования. Запускаем процедуру диагностирования рамы-радиатора, в результате чего получаем диагноз в окошке ПКТД (рис. 2). Сопоставив внесенный дефект и полученный результат диагностирования, подсистема дала верный результат - «отсутствие пасты в элементе V10».

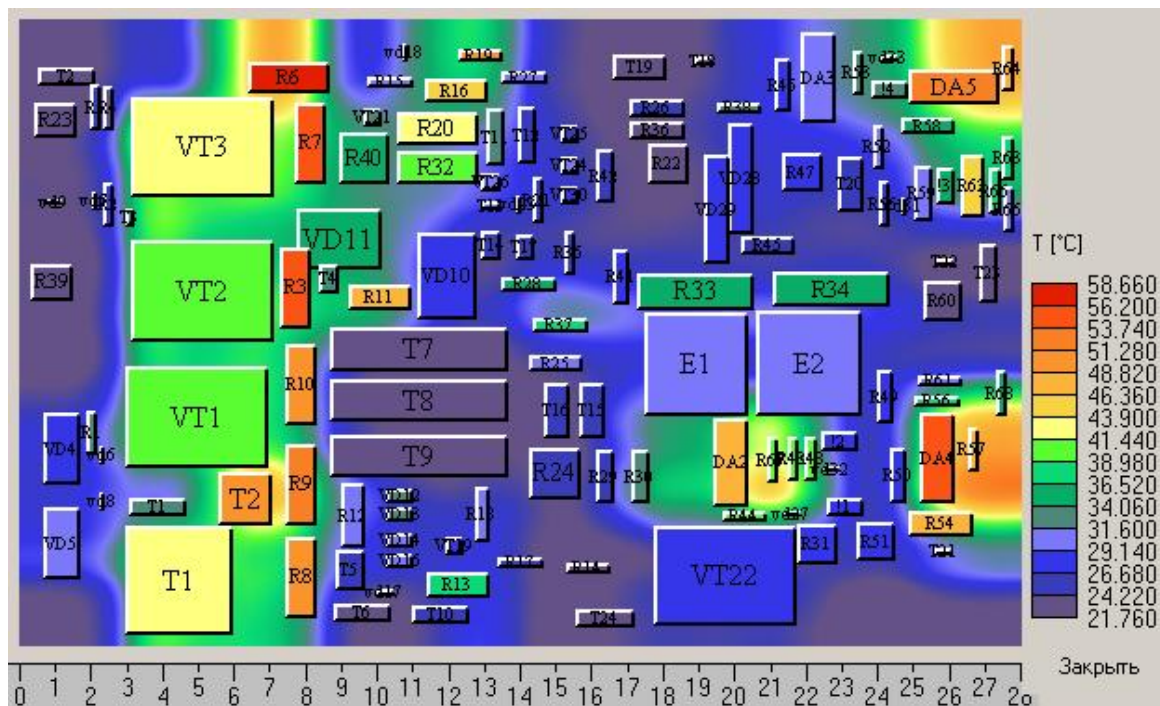


Рис. 2. Термограмма печатного узла ТЮ5.087.780 (без дефектов)

Таблица 1. Измеренные значения температур рамы-радиатора

C5	C6	D1	D5	D6	V7	V9	V10
29,27	28,27	32,63	32,47	32,63	32,47	33,47	41,72

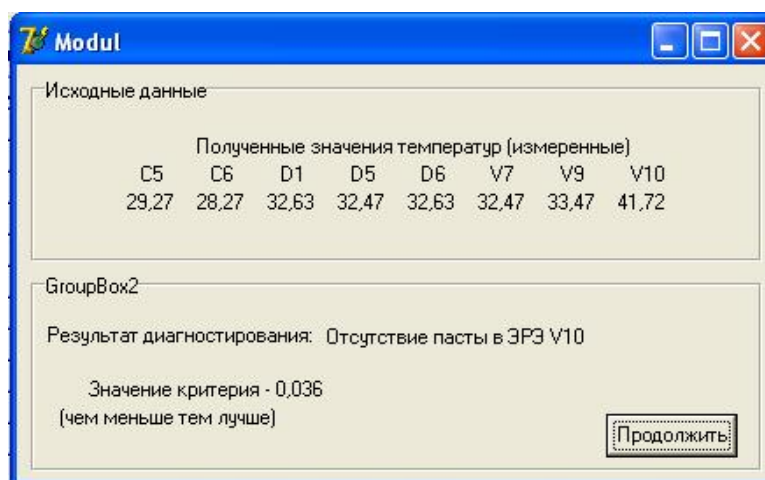


Рис. 3. Вывод результатов в ПКД

Измерение теплового поля проводилось как с помощью контактных датчиков, так и с помощью отечественного тепловизора «Радуга». Перед снятием тепловой картины проводилась калибровка тепловизора по излучателю температуры (абсолютно черное тело).

В результате проведенной серии экспериментов с различными производственными дефектами была получена Таблица 2, в которой перечислены все дефекты, с которыми проводились эксперименты и результаты, выводимые ПКТД.

Таблица 2. Проводимые эксперименты с БП-641

Наименование производственного дефекта, который вносили в исследуемый образец	Выявлено
без дефекта	успешно
обрыв в D1	отрицательно
отсутствие пасты D1	успешно
обрыв в D5	отрицательно
попадание мусора между D6 и радиатором	успешно
отсутствие пасты D6	успешно
попадание мусора между V10 и радиатором	успешно
отсутствие пасты V10	успешно
попадание мусора между V7 и радиатором	успешно
отсутствие пасты V7	успешно
отсутствие пасты V9	успешно
плохое крепление D6	успешно
плохое крепление V7	успешно
плохое крепление V10	успешно
плохое крепление D5 -отсутствие пасты V7	успешно
плохое крепление V7 - попадание мусора в D1	успешно
плохое крепление V9 - попадание мусора в D1	успешно
плохое крепление V10 - мусора в D1	успешно

Вывод

В процессе выполнения эксперимента методика применилась успешно. Анализ полученного диагноза говорит о том, что ПКТД выявлял производственные дефекты достоверно. Практическое использование ПКТД позволяет обеспечить на этапе проектирования контролепригодность радиоэлектронных устройств и средств для возможности его дальнейшего диагностирования на этапах производства и эксплуатации.

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Разработка программного комплекса, позволяющего повысить качество радиотехнических устройств за счет своевременного выявления скрытых дефектов» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры

инновационной России (2009–2013 гг.)». Гос. контракт № 14.740.11.0840 от 01 декабря 2010 г.

Библиографический список

1. Ковалёнок, В. И. Исследование тепловых характеристик РЭС методами математического моделирования: [Текст]. / Коваленок В. И. [и др.]; под ред. А.В. Сарафанова. – М.: Радио и связь, 2003. –456 с.

2. Сулейманов, С. П. Программный комплекс Diaterm мониторинга качества печатных узлов: [Текст]. / С.П. Сулейманов, С.У. Увайсов, Р.И. Увайсов, И.А. Иванов // Качество и ИПИ (CALS) – технологии, 2006г. - №1. -С. 38-42.

THE METHOD OF PROVIDING HEAT TRACEABILITY OF WIRELESS DEVICES AT THE STAGE OF PROJECT

© 2012 S. U. Uvaysov¹, N. K. Yurkov²

¹Higher School of Economics

²Penza State University

In the article the technique of providing the heat of controllability of wireless devices at the stage of проектирования. Shows the results of numerical experimental research of radio equipment of the thermal field on the example of the power supply БП641. Analysis of the results shows that the proposed software identifies manufacturing defects reliably.

Thermal field, non-destructive diagnostics, radio engineering devices, manufacturing defects.

Информация об авторах

Увайсов Сайгид Увайсович, доктор технических наук, профессор, Московский институт электроники и математики НИУ «Высшая школа экономики». E-mail: uvaysov@yandex.ru. Область научных интересов: неразрушающий контроль электронных средств, испытания радиоэлектронных средств, моделирование характеристик бортовой аппаратуры.

Юрков Николай Кондратьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Пензенский государственный университет. E-mail: yurkov_nk@mail.ru. Область научных интересов: надежность и качество радиоэлектронной аппаратуры.

Uvaysov Saygid Uvaysovich, doctor of technical sciences, professor, Moscow Institute of Electronics and Mathematics NRU Higher School of Economics. E-mail: uvaysov@yandex.ru. Area of scientific: non-destructive testing of electronic, electronic test equipment, modeling characteristics of the onboard equipment.

Jurkov Nikolay Kondratjevich, doctor of technical sciences, professor, head of design and production radio-electronic equipment, Penza State University. E-mail: yurkov_nk@mail.ru. Area of scientific: reliability and quality of electronic equipment.

ПРАВИЛЬНАЯ НУМЕРАЦИЯ ДВУХПОЛЮСНОГО ОРИЕНТИРОВАННОГО ГРАФА

© 2012 Д. А. Попова-Коварцева

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

Во многих задачах системного анализа активно используется теория графов, позволяющая с помощью математического аппарата анализа бинарных матриц получать важную информацию об внутреннем устройстве и свойствах моделируемых объектов. В частности алгоритмы правильной нумерации орграфов находят применение в задачах топологической сортировки бесконтурных графов. В статье рассматривается универсальный алгоритм топологической сортировки, позволяющий производить правильную нумерацию, включая контурные орграфы.

Параллельная программа, ориентированный граф, правильная нумерация, вершина ветвления, вершина поглощения, ранг вершины.

Введение

Разработка параллельных программ является более сложным процессом по сравнению с созданием аналогичных последовательных кодов. Отчасти это связано с архитектурными особенностями современных многопроцессорных вычислительных систем параллельной обработки. Учитывая широкую распространенность вычислительных систем с распределенной памятью, для организации информационного взаимодействия между процессорами часто используется интерфейс передачи данных MPI. Несмотря на широкие возможности, которые предоставляет для разработчиков параллельных программ библиотека MPI, её применение сопровождается рядом трудностей связанных с необходимостью рациональной организации управления потоками данных между процессорами и синхронизацией вычислительных процессов. Неслучайно, что в последнее время разрабатываются высокоуровневые средства параллельного программирования, базирующиеся на MPI и облегчающие создание параллельных программ. К таким средствам относятся и система PGRAPH [1, 2].

В системе PGRAPH модель параллельного алгоритма представляется в графическом виде, близком к формализму представ-

ления блок-схем. Описание параллельных программ в виде граф-моделей позволяет реализовать образный, визуальный стиль представления алгоритмов программ и открывает широкие возможности их анализа с помощью методов теории графов.

Основные положения

Система PGRAPH предоставляет пользователю визуальные средства формирования графических образов разрабатываемых алгоритмов, представляемых в виде графа управления, в котором в вершинах граф-модели реализуются функциональные преобразования данных, а на дугах проверяются условия возможности перехода к следующей вершине графа. Различаются три типа дуг графа: *последовательные*, управляемые логическими условиями (предикатами); *параллельные* (безусловные) дуги, «открывающие» параллельную ветку программы и *терминирующие* дуги, завершающие выполнение параллельной ветки программы. Несколько упрощая ситуацию, условимся обозначать последовательные вершины графа квадратами, начало параллельной ветки программы – пустым кружочком, терминирующие вершины – «залитым» кружочком. Примеры граф-моделей программ приведены на рис. 1.

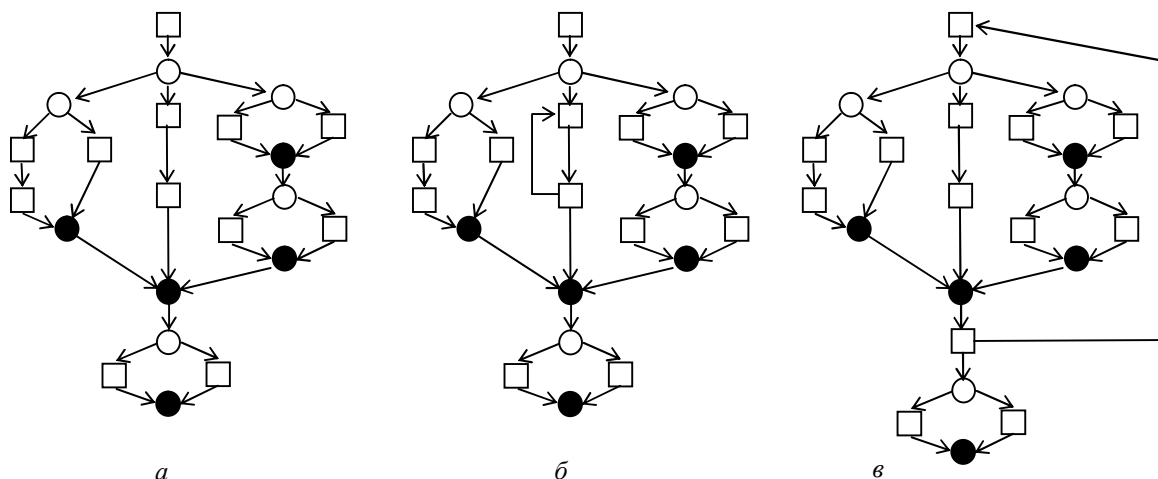


Рис. 1. Примеры граф-программ

По аналогии с последовательно-параллельными схемами соединения ненадежных элементов, используемыми в теории надежности, можно ввести в рассмотрение «классические» последовательно-параллельные модели вычислительных алгоритмов (см. рис. 1, а).

Понятие *классического Р-графа* определим следующим образом: граф, состоящий из одной вершины, является Р-графом; последовательное или параллельное соединение Р-графов (построенное с использованием вершин связок: параллельных и терминирующих вершин) является Р-графом; других Р-графов нет.

Из определения следует, что по построению классический Р-граф является двухполюсным направленным бесконтурным графом. Далее будем использовать алгебраическое определение ориентированного графа, заимствованное из работы [3], где под орграфом понимается пара $\dot{G} = (V, a)$. Здесь V – множество вершин орграфа, $a \subseteq V \times V$ – отношение на множестве V (пара $(u, v) \in a$ называется дугой графа).

В качестве полюсов модели параллельных вычислений, представленной классическим Р-графом, рассматриваются один источник (корень графа) и один сток (концевая вершина графа). Для определения факта принадлежности графа к классу направленных бесконтурных графов удобно использовать

теорему 3.33 работы [3]. Теорема утверждает, что в орграфе \dot{G} существует правильная нумерация вершин тогда и только тогда, когда \dot{G} – бесконтурный граф.

В данном случае под *правильной нумерацией* будем понимать такую нумерацию вершин графа v_1, v_2, \dots, v_n , когда из $(v_i, v_j) \in a$ следует неравенство $i \leq j$. Таким образом, проверка свойств орграфа на принадлежность классу классических Р-графов сводится к построению алгоритма правильной нумерации графа.

Однако в практических приложениях при построении моделей параллельных алгоритмов в системе PGRAPH используются не только классические схемы Р-графа. В принципе орграф может содержать циклы (см. рис. 1, случаи б и в). В этом случае необходимо произвести предварительное расконтуривание графа, когда из всех контуров графа удаляют по одной дуге. Теорема 3.36 [3] позволяет производить подобные операции без нарушения связности графа. Теорема утверждает, что минимальное расконтуривание связного графа не нарушает его связности. Фактически расконтуривание превращает двухполюсный орграф в классический Р-граф.

Введем понятие *ранга* вершины двухполюсного графа. Под *рангом* $r(v)$ вершины v графа $\dot{G} = (V, a)$ будем понимать наибольшую из длин простых путей, начи-

нающихся из корневой вершины и заканчивающихся в вершине v .

Вершиной поглощения назовем вершину, в которую входят одна или несколько непомеченных дуг. *Вершиной ветвления* назовем вершину, в которую входят только помеченные дуги и которая имеет, по крайней мере, две исходящие дуги. Статус «поглощения» будем считать более приоритетным по сравнению со статусом «ветвления».

Алгоритм правильной нумерации

Предлагается алгоритм нумерации вершин графа, состоящий из двух этапов. На первом этапе для всех вершин графа вычисляются их ранги. Для контурных графов производится его расконтуривание. На втором - реализуется правильная нумерация его вершин.

Введем четыре списка: S_{out} – вершин ветвления, S_{in} – вершин поглощения, S_r – список вершин, которым присвоен ранг, S_L – список неиспользуемых (свободных) вершин $S_L = V / (S_{in} \cup S_{out} \cup S_r)$. Введем операции добавления и удаления из списков его элементов: $add(\cdot, \cdot)$ и $del(\cdot, \cdot)$.

Алгоритм P-нумерации.

Шаг 0. Фиктивной дуге (∞, v_0) , входящей в корневую вершину, присваивается ранг равный $r(\infty, v_0) = -1$. Если корневая вершина имеет статус «поглощающей», то все входящие в корневую вершину дуги удаляются, а в качестве текущей вершины рассматривается корневая вершина v_0 . Переходим к шагу 1.

Шаг 1. Текущей вершине v_{i_k} , рассматриваемой на k -й итерации алгоритма, присваивается ранг:

$$r(v_{i_k}) = \begin{cases} r((v_{i_{k-1}}, v_{i_k})) + 1, & \text{если } v_{i_k} \text{ – вершина ветвления,} \\ \max_b r((v_b, v_{i_k})) + 1, & \text{иначе } ((v_b, v_{i_k}) \in a). \end{cases}$$

Если вершина v_{i_k} является вершиной ветвления, то выполняется операция пополнения списка $S_{out} : add(S_{out}, v_{i_k})$.

Шаг 2. Для текущей вершины v_{i_k} выбирается непомеченная дуга перехода в следующую вершину. Выбранная дуга помечается рангом вершины v_{i_k} :

$$r((v_{i_k}, v_{i_{k+1}})) = r(v_{i_k}).$$

Если все дуги, исходящие из этой вершины помечены, то автоматически выполняется операция $del(S_{out}, v_{i_k})$.

Шаг 3. Анализируется статус вершины $v_{i_{k+1}}$, исходящей из v_{i_k} , в направлении помеченной дуги: $(v_{i_k}, v_{i_{k+1}}) \in a$.

Шаг 4. Если вершина $v_{i_{k+1}}$ не является вершиной поглощения, то в качестве текущей вершины рассматривается вершина $v_{i_{k+1}}$. Переходим к шагу 1.

Шаг 5. Иначе, при условии $v_{i_{k+1}} \notin S_{in}$, выполняется операция пополнения списка $S_{in} : add(S_{in}, v_{i_{k+1}})$. Если не все дуги, входящие в вершину $v_{i_{k+1}}$ помечены, то из списка S_{out} выбирается последний элемент $v_j \in S_{out}$, который рассматривается как текущий. Переходим к шагу 2.

Шаг 6. Если все дуги, входящие в вершину $v_{i_{k+1}}$ помечены, то выполняется операция $del(S_{in}, v_{i_{k+1}})$ и в качестве текущей вершины выбирается $v_{i_{k+1}}$. Переходим к шагу 1.;

Шаг 7. Если список S_{out} – пуст, а в списке S_{in} имеются элементы $S_{in} = [v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_{k+1}}]$, то это означает, что в графе \hat{G} имеются контуры. Причем в циклических маршрутах участвует одна или несколько вершин списка S_{in} . Для идентификации вершин, принадлежащих контурам, для подграфа, составленного из вершин V / S_r , строится двоичная булева матрица

смежности M и ее степени $M^2, M^3, \dots, M^k, k \leq n$ до тех пор, пока не возникнет ситуация $\exists j (m_{jj}^{(k)} = 1)$. Последнее означает, что в вершину v_j существует циклический маршрут, состоящий из k шагов. Составляется список

$$\tilde{S}_{in} = [v_{j_1}, v_{j_2}, \dots, v_{j_m}] \subseteq S_{in}, m_{j_i j_i}^{(k)} = 1, i = 1, \dots, m.$$

Из списка \tilde{S}_{in} выбирается вершина v_b , имеющая наименьшее количество предшественников, не принадлежащих спискам S_{in}, S_r . В графе удаляются все непомянутые дуги, входящие в вершину v_b и выполняется операция $del(S_{in}, v_b)$, т.е. производится расконтуривание графа. В качестве текущей вершины выбирается вершина v_b . Переходим к шагу 1.

Шаг 8. Если списки S_{out} и S_{in} пусты и достигнута конечная вершина, то переходим к шагу 9.

Шаг 9. Вершины орграфа нумеруются послойно от корневой вершины до конечной. Под слоем графа будем понимать вершины равного ранга.

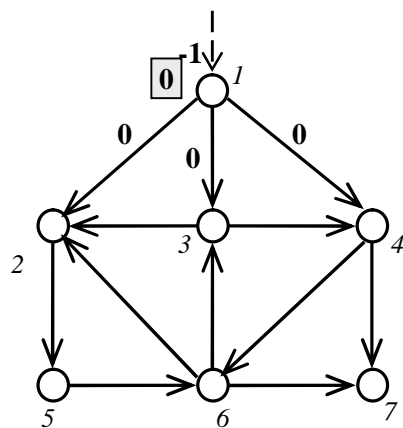
Утверждение

Для двухполюсного орграфа алгоритм R -нумерации реализует правильную нумерацию его вершин.

Пример

Рассмотрим работу алгоритма на примере контурного графа, представленного на рисунке 3. Разметка, приведенная на рис. 3, соответствует случаю, когда алгоритм обнаружил первый контур графа. Дуги размечены рангом вершины, из которых они исходят. Из рисунка видно, что ранг равный нулю приобрела вершина 1, размечены все исходящие дуги 1-2, 1-3, 1-4.

Для определения контурных вершин на множестве V/S_r построим матрицу смежности и матрицы её степеней.



$$S_{in} = [2, 3, 4],$$

$$S_{out} = \emptyset,$$

$$S_r = [1].$$

Рис. 3

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix}; \quad M^2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix};$$

$$M^3 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix}.$$

Из матрицы M^3 видно, что в циклических маршрутах участвуют вершины 2, 3, 4, 5, 6. Причем вершины 2, 3, 4 входят в список S_{in} и каждая из них связана с циклами. Например, вершина 2 входит в цикл 2-5-6-2; вершина 3 – 3-4-6-3 и 3-2-5-6-3; вершина 4 – 4-6-3-4. В качестве разрешающего элемента выбирается вершина 3, поскольку в неё входит только одна дуга, а в цикле участвуют две вершины (3 и 4). Из графа удалим дугу 6-3. В результате получим разметку, представленную на рис. 4, а).

Алгоритм вновь «наталкивается» на новый контур 2-5-6-2, который определяется из матрицы:

$$M^3 = \begin{array}{c|ccccc} & 2 & 5 & 6 & 7 \\ \hline 2 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 5 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}.$$

Удалив дугу 6-2, получим бесконтурный граф, представленный на рис. 4, б) с окончательной разметкой вершин графа. Правильная нумерация графа представлена на рис. 5.

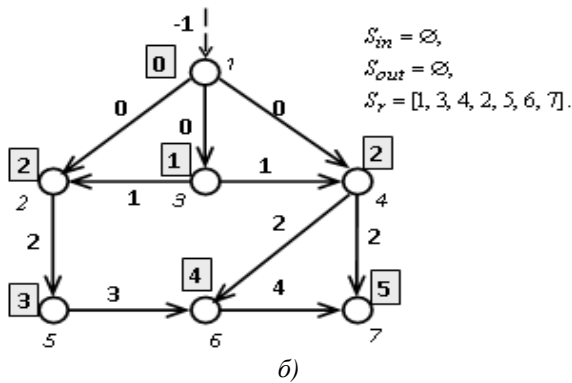
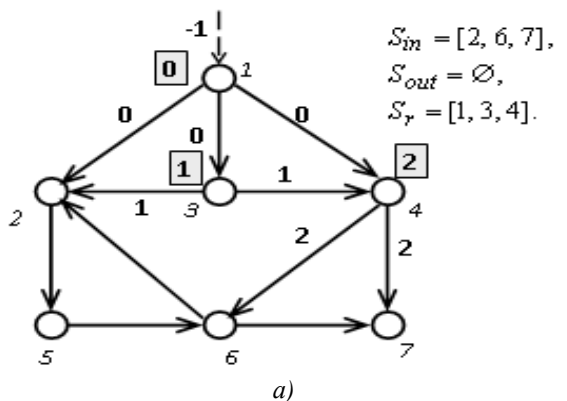


Рис. 4

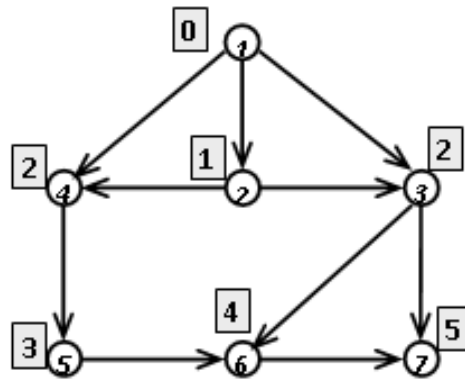


Рис. 5

Заключение

В работе предложен эффективный универсальный алгоритм правильной нумерации двухполосного направленного графа. Его универсальность заключается в том, что он одновременно позволяет выявлять контуры в графе, реализовывать их расконтуривание и производить правильную нумерацию вершин графа. Предложенный алгоритм полезен на этапе анализа параллельного алгоритма, созданного разработчиком с помощью средства PGRAPH, поскольку реальная модель в отличие от классической последовательно-параллельной бесконтурной схемы, может содержать контуры в последовательных ветках алгоритма (см. рис. 1, б) и в циклах исполнения параллельных «группировок» (см. рис. 1, в). В то время как в области параллельного программирования, корректность разрабатываемой модели алгоритма имеет решающее значение для обеспечения качества программного продукта.

Библиографический список

1. Коварцев, А.Н. Автоматизация разработки и тестирования программных средств [Текст] / А.Н. Коварцев. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 1999. – 150 с.
2. Жидченко, В. В. Моделирование синхронных параллельных вычислений при построении математических моделей сложных систем [Текст] / В. В. Жидченко, А. Н. Коварцев // Первая международная конференция «Системный анализ и информационные технологии» САИТ-2005: Труды конференции. В 2 т. – Т.2. – М.: КомКнига, 2005. – С. 154-160.

3. Богомолов А.М., Салий В.Н. Алгебраические основы теории дискретных систем. – М.: Наука, 1997. - 368 с.

CORRECT NUMERING OF TWO-POLE DIRECTED GRAPHS

© 2012 D. A. Popova-Kovartseva

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

In many problems of the system analysis a graph theory is widely used, which allows using the mathematical apparatus of analysis of binary matrices to obtain important information about the internal structure and properties of the simulated objects. In particular, algorithms for proper numbering directed graphs are used in problems of topological sorting acyclic graphs. The article deals with the universal topological sorting algorithm that allows for the correct numbering, including contour digraphs.

Parallel program, directed graph, correct numering, top of branching, top of absorption, rank of top.

Информация об авторе

Попова-Коварцева Дарья Александровна, аспирант кафедры программных систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: DakKovr@mail.ru. Область научных интересов: автоматизации программирования, системный анализ.

Popova-Kovartseva Daria Alexandrovna, post-graduate student of the sub-department software systems, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: DakKovr@mail.ru. Area of scientific: automated programming, systems analysis.

ВАКУУМНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ С ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ

© 2012 А. А. Ръжов, Н. К. Юрков, А. А. Ромашин

Пензенский государственный университет

Предложен способ уменьшения температурной нестабильности в вакуумных конденсаторах с использованием биметаллов. Представлены расчеты изменения емкости конденсатора с биметаллической пластинкой при нагреве.

Вакуумный конденсатор, биметалл, емкость, температурный коэффициент емкости.

Введение

Вакуумные конденсаторы нашли широкое применение в высоковольтной высокочастотной радиоэлектронной аппаратуре. Использование вакуума в качестве диэлектрика позволяет создать конденсаторы, которые в определенной области рабочих частот при небольших весах и габаритах обладают лучшей совокупностью электрических и эксплуатационных характеристик по сравнению с газонаполненными, слюдяными и керамическими.

Вакуумные конденсаторы имеют высокую температурную стабильность. Температурный коэффициент емкости их (ТКЕ) составляет $(40-80) \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ у постоянных конденсаторов и $(80-120) \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ у конденсаторов переменной емкости.

Для эксплуатации новой радиоэлектронной аппаратуры требуются вакуумные конденсаторы с ТКЕ в 4-5 раз меньше.

Для воздушных конденсаторов переменной емкости с плоскими электродами для снижения ТКЕ было предложено использовать биметаллическую пластинку в качестве движителя ротора. При повышении температуры биметаллическая пластина воздействует на ротор, положение пластин относительно друг друга изменяется, емкость блока уменьшается, компенсируя изменение его емкости за счет расширения пластин, вызванного повышением температуры [1].

Другое решение проблемы компенсации температурного изменения величины емкости переменных воздушных конденсаторов связано с использованием биметаллической пластинки в качестве емкостного электрода. Температурная компенсация емкости может быть выполнена, если эта пластинка будет при нагреве отклоняться от смежного электрода, уменьшая емкость блока.

На рис. 1 приведены обозначения размеров плоского конденсатора. Верхняя пластинка выполнена из биметалла [2,3]. Длина пластины l ширина b , толщина h , площадь ее $S = bl$.

Расстояние между пластинами при нулевом нагреве равно y_0 . На расстоянии x от места заделки при нагреве на Δt пластины отодвинутся друг от друга на величину $y_0 + y$. Емкость обеих пластин при нулевом нагреве составит [1]:

$$C_0 = \frac{kS}{y_0}. \quad (1)$$

Емкость элемента площадью $dS = bdx$ на расстоянии x будет равна:

$$dC = k \frac{bdx}{y_0 + y}. \quad (2)$$

Разность положений биметаллической пластинки в теплом и холодном состоянии на расстоянии x от места заделки составит:

$$y = (y_0 + y) - y_0 = \frac{kx^2 \Delta t}{h}. \quad (3)$$

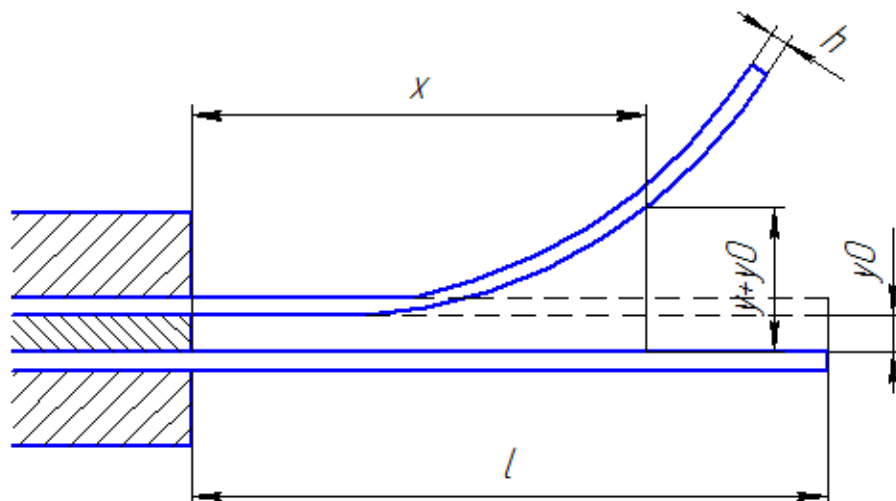


Рис. 1. Схема конденсатора с биметаллической пластинкой (для расчета)

Разделив обе части равенства на y_0 , получим:

$$\frac{y}{y_0} = \frac{kx^2 \Delta t}{y_0 h} = a^2 x^2, \quad (4)$$

где $a^2 = \frac{k \Delta t}{h y_0}$.

Емкость всей площадки при нагреве может быть найдена из равенства:

$$C = \frac{kb}{y_0} \int_0^l \frac{dx}{1 + a^2 x^2} = \frac{kb}{a y_0} \operatorname{arctg} a l \approx \frac{kb}{a y_0} \left(a l - \frac{a^3 l^3}{3} \right). \quad (5)$$

Изменение емкости, вызванное нагревом, составит

$$\Delta C = C - C_0 \approx -\frac{k b a^2 l^3}{3 y_0} = \frac{k_1 k b l^3 \Delta t}{3 h y_0^2}, [\Phi] \quad (6)$$

Емкость при нагреве Δt будет [1]:

$$C = C_0 + \Delta C = C_0 \left(1 - \frac{k_1 l^2}{3 h y_0} \right), \quad (7)$$

где k_1 – удельный прогиб биметаллической пластинки, $\frac{1}{\sigma C}$, $k = e \cdot e_0$,

e – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора;

$e_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума. Формула (7) получена при использовании ряда допущений.

Можно предложить другой подход определения изменения емкости от температуры для системы биметаллическая пластинка – бесконечная однородная пластинка.

При проектировании конденсатора с «нулевым» (малым) ТКЕ с использованием биметаллической пластинки необходимо приравнять полученное выражение ΔC к изменению емкости конденсатора с плоскими электродами, то есть с параллельными пластинами из однородного металла.

Формула изменения емкости при нагреве за счет изгиба биметаллической пластины

$$\Delta C = \frac{k \varepsilon_0 \varepsilon b l \Delta t}{3 h y_0^2}, [\Phi] \quad (8)$$

где l – длина пластины, м; b – ширина пластинки, м; h – толщина пластины, м; y_0 – начальный зазор между электродами, м; Δt – нагрев, $^{\circ}\text{C}$.

Биметаллическая прямая пластинка при нагреве деформируется так, что в результате образует часть окружности. Радиус окружности, являющейся нейтральной осью второго слоя пластинки, показанной на рис.1, может быть найден следующим образом. Предполагается, что до нагрева прямая пластина прямоугольного сечения одинакова по всей длине, во всех точках имеет температуру t_0 .

При этой температуре в пластине нет внутренних напряжений. Из всей длины l

биметаллической пластинки рассмотрим только ее элементарную длину dx . Обозначим температурный коэффициент линейного расширения 1 и 2 компонентов соответственно через a_1 и a_2 . Если температура пластинки t_0 , то вследствие нагрева, равного $\Delta t = t - t_0$, она деформируется (рис. 1). Так как пластинка на всей длине имеет одно и то же сечение, одинаковую температуру и внутреннее напряжение, то ее изгиб будет равномерным и после деформации она будет представлять дугу окружности. Напряжение обоих слоев распределяется по сечению относительно нейтральной оси каждого слоя, как показано на рис. 2 (справа). Длины по нейтральным осям рассматриваемых частей пластинки после ее нагрева обозначим в соответствии с рис. 1:

$$dx_1 = (1 + a_1 \Delta t) dx = (r_2 + h_n) dj, \quad (9)$$

$$dx_2 = (1 + a_2 \Delta t) dx = r_2 dj. \quad (10)$$

Исключая из этих двух уравнений угол dj , получаем:

$$\frac{1 + a_1 \Delta t}{r + h_n} = \frac{1 + a_2 \Delta t}{r_2}. \quad (11)$$

После простого преобразования найдем радиус кривизны нейтральной оси второго слоя

$$r_2 = \frac{h_n(1 + a_2 \Delta t)}{(a_1 - a_2) \Delta t}. \quad (12)$$

Так как a_2 обычно имеет величину порядка 10^{-6} , а максимальная величина нагрева Δt может достигать только несколько десятков градусов, то радиус кривизны приближенно выразится как:

$$r_2 \approx \frac{h_n}{(a_1 - a_2) \Delta t}; \quad (13)$$

$$\frac{1}{r_2} \approx \frac{(a_1 - a_2) \Delta t}{h_n} \quad (14)$$

при $r_2 > h$, $r_1 \approx r_2 = r$.

Как известно из теории упругости, линия изгиба продольных волокон пластинки (для малых изгибов) математически выражается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \pm \frac{1}{r} = \frac{M}{E_0 I_0}, \quad (15)$$

где M – изгибающий момент; E_0 – эффективный модуль упругости всего сечения пластинки; I_0 – момент инерции сечения пластинки.

Подставляя значение радиуса r из (14), получаем:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(a_1 - a_2) \Delta t}{h_n}. \quad (16)$$

Интегрируя это уравнение, можно найти:

$$y = \frac{(a_1 - a_2) \Delta t}{2h_n} x^2 + C_1 x + C_2. \quad (17)$$

На рис. 2 представлена биметаллическая пластинка длиной l прямоугольного сечения $S = bh$. До нагревания, т.е. при $\Delta t = 0$, пластинка прямая [4]. После нагрева на величину $\Delta t = t - t_0$ пластинка деформируется, образуя часть окружности. Постоянные интегрирования C_1 и C_2 в (17) определяются из условий, что при $x = 0$, $y = 0$.

Отсюда следует, что $C_1 = C_2 = 0$. Поэтому (17) можно написать в виде:

$$y = \frac{(a_1 - a_2) \Delta t}{2h_n} x^2. \quad (18)$$

Этим уравнением определяются координаты производной точки пластинки на расстоянии x от места закрепления. Для свободного конца пластинки это уравнение принимает следующий вид:

$$\Delta y = \frac{(a_1 - a_2) l_2 \Delta t}{2h_n}, \quad (19)$$

где $l = x$, а вместо y перемещение свободного конца пластинки записано в виде Δy . Обозначая через k постоянную величину

$$k = \frac{a_1 - a_2}{2h_n} = \frac{(a_1 - a_2) h}{2h_n},$$

представим Δy в более простом виде:

$$\Delta y = \frac{kl^2 \Delta j}{h}. \quad (20)$$

Этим важным и очень часто встречающимся в литературе уравнением выражается прогиб прямой биметаллической пластинки, имеющей одинаковое по всей длине прямоугольное сечение $S=bh$, толщину $h=l$ и ширину b , при ее одинаковом нагреве Δt по всему сечению и по всей длине. Следует иметь в виду, что (17) дает удовлетворительную точность в том случае, если прогиб Δy значительно меньше длины пластинки l . Постоянная k называется удельным изгибом, т.е. изгибом свободного конца прямой пластинки, толщина и длина которой равны единице (например, $h=1$ мм, $l=1$ мм или $h=1$ см, $l=1$ см), при нагреве $\Delta t=1^\circ\text{C}$. Для часто применяемых биметаллических

материалов эта постоянная всегда указывается и является сравнительно малой величиной.

Постоянная k в практике чаще всего определяется экспериментальным путем. Для расчета иногда необходимо знать угол поворота сечения пластинки (рис. 3). Для практического применения можно использовать выражение:

$$a = \frac{2k\Delta j}{h} \quad (21)$$

и для конечной точки:

$$a_0 = \frac{2kx\Delta j}{h}. \quad (22)$$

Полученные формулы и способы использования биметаллических пластинок в качестве емкостных частей вакуумного кон-

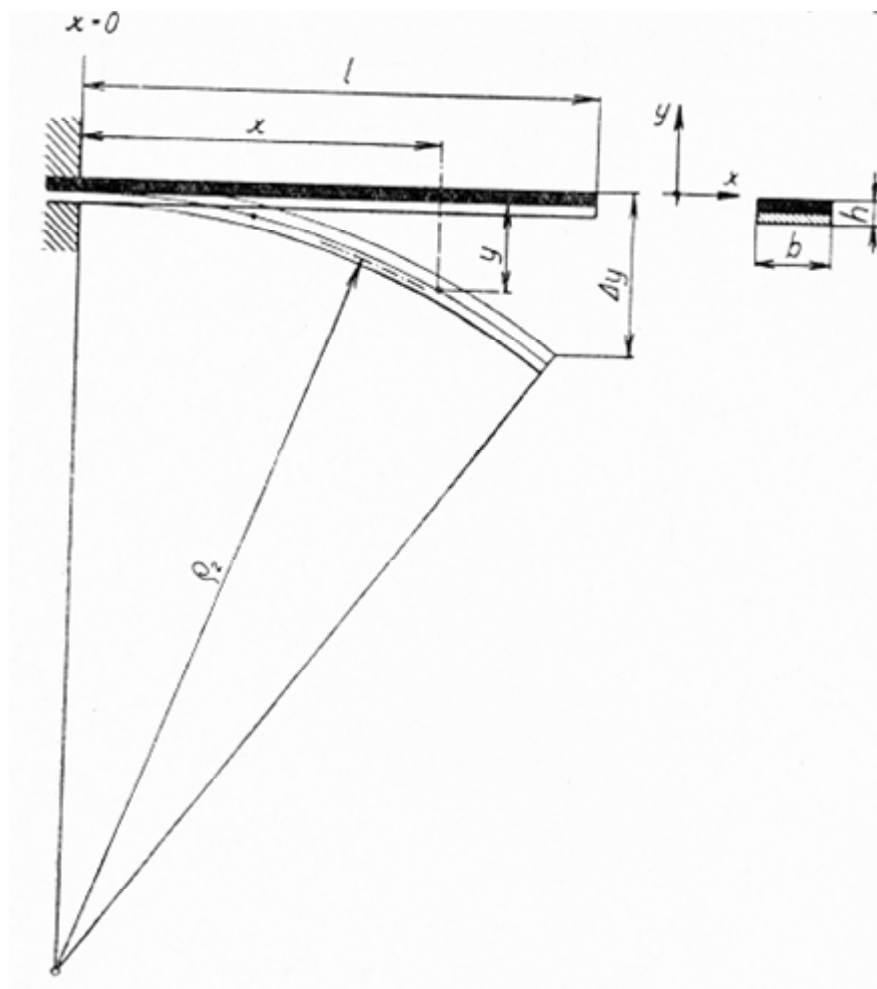


Рис. 2. Изгиб биметаллической прямой пластинки, вызванный ее нагревом

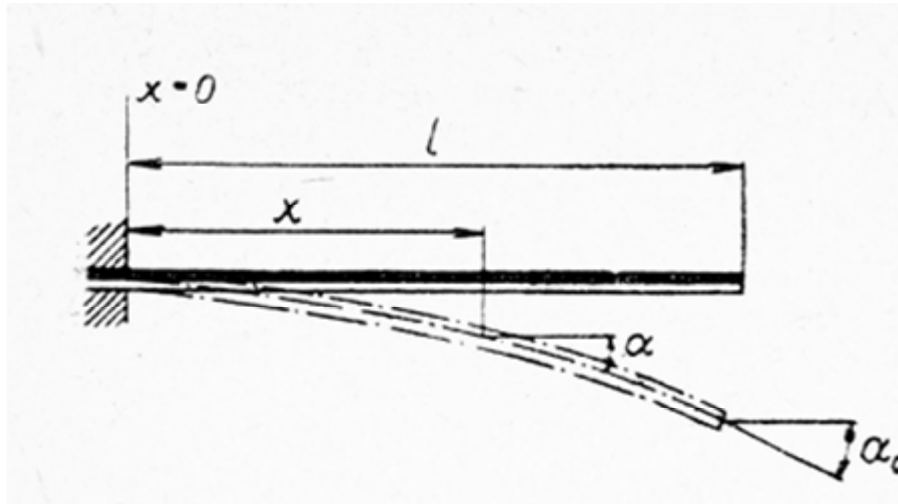


Рис. 3. Угол поворота сечения пластинки при ее изгибе

денсатора дают возможность создания конденсатора с минимальным ТКЕ.

Заключение

Предложенный способ уменьшения температурного коэффициента емкости с помощью биметаллических пластинок дает возможность уменьшить влияние нагрева на изменение емкости вакуумных конденсаторов. Применение биметаллических пластинок позволяет уменьшить в 4...5 раз ТКЕ вакуумных конденсаторов по сравнению с существующими.

Библиографический список

1. Кашпар, Ф. Термо-биметаллы в электротехнике: Пер. с чеш. / [Текст] Кашпар Ф. - М.-Л. : Б.и., 1961.- 447с.

2. Рыжов, А.А. Расчет напряженности электростатического поля на внутренней поверхности керамической оболочки вакуумного конденсатора [Текст] / А.А. Рыжов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество 2011». – Пенза: ПГУ, 2011.- Т. 2. - С. 201 – 202.

3. Clyne, T.W. «Residual stresses in surface coatings and their effects on interfacial debonding» Key Engineering Materials (Switzerland). 1996.-Vol. 116-117, pp. 307-330.

4. Юрков, Н.К. Методика расчета коэффициента температурного изменения и коэффициента деления высоковольтного вакуумного делителя [Текст] / Н.К. Юрков, Э.Н. Смирнов, В.П. Буц // Известия Института инженерной физики. - 2010. - №3. - С.48 - 53.

VACUUM CAPACITORS WITH HIGH TEMPERATURE STABILITY

© 2012 A. A. Ryzhov, N. K. Jurkov, A. A. Romashin

Penza State University

The article deals with the approach of decreasing of temperature instability in vacuum capacitors using bimetals. The calculations of capacitor capacitance change with bimetallic strip during heating are given.

Vacuum capacitor, bimetal, capacitance, temperature coefficient of capacitance.

Информация об авторах

Рыжов Александр Алексеевич, аспирант, Пензенский государственный университет. E-mail: pgufr@mail.ru. Область научных интересов: конденсаторы для радиоэлектронной аппаратуры.

Юрков Николай Кондратьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Пензенский государственный университет. E-mail: yurkov_nk@mail.ru. Область научных интересов: надежность и качество радиоэлектронной аппаратуры.

Ромашин Александр Александрович, студент, Пензенский государственный университет. E-mail: rgu@penza.net. Область научных интересов: элементарная база радиоэлектронных средств.

Ryzhov Alexander Alekseevich, post-graduate student, Penza State University. E-mail: pgufr@mail.ru. Area of scientific: capacitors for electronic equipment.

Jurkov Nikolay Kondratjevich, doctor of technical sciences, professor, head of design and production radio-electronic equipment, Penza State University. E-mail: yurkov_nk@mail.ru. Area of scientific: reliability and quality of electronic equipment.

Romashin Alexander Alexandrovich, student, Penza State University. E-mail: rgu@penza.net. Area of scientific: elementary base electronic means.

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ - АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА

© 2012 М. Н. Пиганов, В. Д. Дмитриев, С. В. Тюлевин, А. В. Кочкина

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

Проведён анализ работы туннельного диода, рассмотрена эквивалентная схема, проведено моделирование прямой ветви вольт-амперной характеристики, приведены расчетные зависимости функций, составляющих вольт-амперную характеристику.

Туннельный диод, вольт-амперная характеристика, анализ, моделирование.

Введение

Туннельный диод – это полупроводниковый диод, изготовленный на основе вырожденного полупроводника, т.е. полупроводника с высокой концентрацией примесей, в котором туннельный эффект приводит к появлению на вольт-амперной характеристике участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением [1]. Он был открыт в 1958г. японским физиком, профессором Токийского университета Лео Эсаки [2]. На падающем участке вольт-амперной характеристики (ВАХ) туннельный диод представляет собой активный двухполосник, что позволяет реализовать на его основе широкий круг радиоэлектронных устройств: усилители, генераторы, преобразователи частоты, детекторы, смесители, запоминающие устройства и др. Туннельный диод способен работать на достаточно больших частотах ($10^{10} \dots 10^{11}$ Гц), при высоких температурах (до 400°C), и больших уровнях радиации (до 10^{17} нейтронов / см^3); обладает низким уровнем собственных шумов.

Толщина электрического перехода туннельных диодов составляет $1 \dots 10$ нм. Туннельные переходы совершаются носителями заряда без затраты энергии. Высокая концентрация примесей в p и n -областях туннельного диода приводит к тому, что локальные уровни примесей образуют в вырожденных полупроводниках сплошную зону. Уровни Ферми полупроводников $E_{\text{фр}}$ и

$E_{\text{фп}}$ будут расположены соответственно в валентной зоне p -области и зоне проводимости n -области. В состоянии термодинамического равновесия измеренный ток через переход равен 0. При небольших прямых напряжениях заполненные электронами энергетические уровни зоны проводимости n -области частично расположатся напротив свободных уровней валентной зоны p -областей. Поэтому, в основном, будут наблюдаться туннельные переходы электронов из n в p -область, появится прямой ток диода. Вольт - амперная характеристика туннельного диода при смещениях будет образована суммированием туннельного тока и тока ВАХ p - n -перехода (тока инжекции) [3].

Эквивалентная схема туннельного диода

Эквивалентная схема диода приведена на рис. 1 [2]. Верхняя часть схемы содержит элементы собственно диода, а нижняя – элементы внешней цепи.

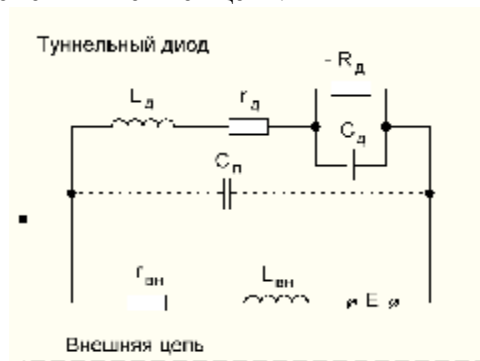


Рис. 1. Эквивалентная схема туннельного диода

На схеме приняты следующие обозначения:

$-R_d = \frac{du}{di}$ – дифференциальное отрицательное сопротивление туннельного диода, пропорциональное наклону падающего участка вольт-амперной характеристики в точке, определяемой смещением. Модуль дифференциального сопротивления $|-R_d|$ практически не зависит от частоты до 10^{13} Гц, и он тем меньше, чем больше примесей содержится в n и p -областях диода. Диод, работающий в диапазоне СВЧ, должен иметь малое значение $|-R_d|$. В то же время величина $|-R_d|$ не должна быть существенно меньше волновых сопротивлений волноводных и коаксиальных трактов, в которых работает диод, так как необходимо согласовать эти сопротивления в довольно широком диапазоне частот. Кроме того, малые значения $|-R_d|$ создают трудности для получения устойчивой рабочей точки в схеме подачи смещения и при подавлении паразитных колебаний в резонансной системе усилителя. Зависимость модуля дифференциального сопротивления диода от величины приложенного напряжения носит существенно нелинейный характер. Характер нелинейности влияет на динамический диапазон усилителя и на вид колебаний в генераторе.

C_d – ёмкость диода, определяемая ёмкостью p - n -перехода. Она изменяется в пределах падающего участка вольт-амперной характеристики примерно на 20%.

r_d – суммарное сопротивление потерь в материале полупроводника, в контактах и выводах. Сопротивление r_d имеет примерно одно и то же значение в пределах всего рабочего участка вольт-амперной характеристики.

L_d – суммарная индуктивность диода, в которую входят индуктивность патрона и выводов; зависит в основном от геометрической формы выводов.

C_{Π} – паразитная емкость патрона и выводов прибора. У современных туннельных диодов эта емкость мала и в большинстве случаев ее можно не учитывать функцией вида

вать, поэтому на эквивалентной схеме она показана пунктиром.

$r_{вн}$, $L_{вн}$ – элементы, учитывающие параметры внешних проводов, нагрузки и параметры источника питания.

Числовые значения параметров R_d , C_d , r_d и L_d зависят от материала, из которого изготовлен туннельный диод, его конструктивного оформления, концентрации примесей и лежат в пределах: $|-R_d| = 5 \dots 500$ Ом; $C_d = 1 \dots 200$ пф (у лучших диодов $C_d = 0,2 \dots 2$ пф); $L_d = 10^{-8} \dots 10^{-10}$ Гн; $r_d = 1 \dots 15$ Ом.

Моделирование ВАХ

Прямая ветвь вольт-амперной характеристики (ВАХ) туннельного диода характеризуется параметрами y_{max} при значениях x_1 , y_{min} при x_2 , падающим и возрастающим участками в интервалах $x_1 \dots x_2$ и $x_2 \dots x_3$ соответственно (рис. 2).

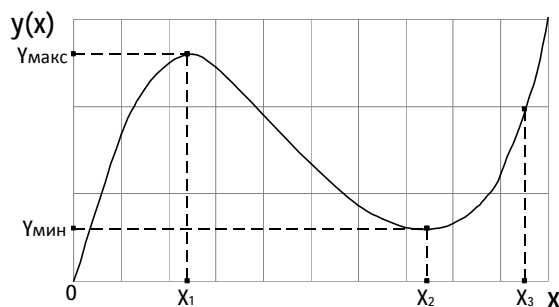


Рис. 2. ВАХ туннельного диода

Для моделирования вольт-амперную характеристику диода рассмотрим в виде двух основных участков: участка туннельного тока (интервал $0 \dots x_2$) и участка тока инжекции (интервал $x_2 \dots x_3$) и обозначим их функциями $y_1(x)$ и $y_2(x)$ соответственно. Следовательно, полную зависимость ВАХ представим в виде суммы двух функций $y(x) = y_1(x) + y_2(x)$. В качестве $y_1(x)$ используем известную функцию [1]

$$y_1(x) = a \cdot x^b e^{-cx}, \quad (1)$$

в которой a , b и c – положительные коэффициенты, причем a и c определяют уровень экстремума и крутизну падающего участка характеристики. Для формирования второй части ВАХ воспользуемся экспонен-

$$y_2(x) = d \cdot (e^{kx} - 1), \quad (2)$$

где коэффициенты d и k положительны и определяют уровень и крутизну функции соответственно. При этом общую функцию $y(x)$ ВАХ туннельного диода представим в виде

$$y(x) = a \cdot x^b e^{-cx} + d \cdot (e^{kx} - 1). \quad (3)$$

Коэффициенты a, b, c, d и k заданной функции взаимосвязаны со значениями $y_{max}, y_{min}, x_1, x_2$, исходящими из условия $\frac{\partial y(x)}{\partial x} = 0$, т.е.

$$x^b \left(\frac{1}{x} - \frac{c}{b} \right) + \frac{kd}{ab} e^{(k+c) \cdot x} = 0. \quad (4)$$

Определение коэффициентов a, b, c, d и k из выражений (3) и (4) связано с решением систем сложных алгебраических уравнений. Однако задачу можно упростить, допуская, что влияние функции $y_2(x)$ на значения x_1 и y_{max} мало.

При этом параметр x_1 определяется из условия $\frac{\partial y_1(x)}{\partial x} = 0$, из которого следует $x_1 = b/c$. (5)

Следовательно, исходя из выражений (1) и (5), запишем зависимость для значения экстремума (y_{max})
$$y_{max} = a \cdot x_1^b e^{-cx_1}, \quad (6)$$
 где x_1 и y_{max} – справочные или экспериментальные данные туннельного диода.

Для определения коэффициентов k и d на основе выражений (3)...(5) составим

$$\begin{cases} x_2^b \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right) = \frac{kd}{ab} e^{(k+c) \cdot x_2}; \\ y_{min} = a \cdot x_2^b \cdot e^{-cx_2} + d \cdot (e^{kx_2} - 1). \end{cases} \quad (7)$$

систему уравнений

Решая данную систему уравнений относительно коэффициентов k и d , получаем

$$\frac{1}{k} (1 - e^{-kx_2}) = \frac{(y_{min} \cdot e^{cx_2} \cdot x_2^{-b} - a) \cdot x_1 \cdot x_2}{ab(x_2 - x_1)}; \quad (8)$$

$$d = \frac{ab \cdot (x_2 - x_1) \cdot x_2^b}{k \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot e^{(k+c)x_2}}. \quad (9)$$

При условии $e^{-kx_2} \ll 1$ (реально $kx_2 > 5$) выражение (8) упрощается:

$$\frac{1}{k} = (y_{min} \cdot e^{cx_2} \cdot x_2^{-b} - a), \quad (10)$$

где x_1, x_2 и y_{min} – справочные или экспериментальные данные туннельного диода.

Для подтверждения достоверности данной разработки приведены расчеты функции $y(x)$ для различных значений коэффициентов. Один из вариантов расчета ВАХ при параметрах $a = 364$; $b = 1,97$; $c = 7,0$ и $d = 1,34 \cdot 10^{-4}$ для различных значений k приведен на рис. 3.

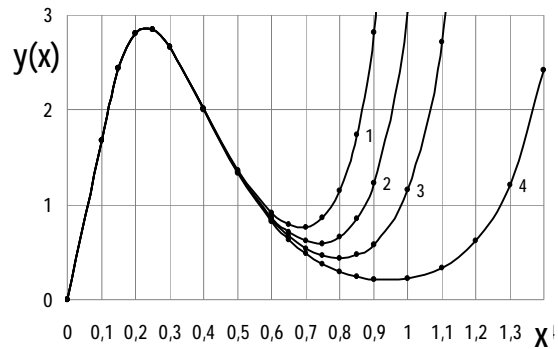


Рис. 3. Вольтамперные характеристики туннельного диода: 1- $k=11$; 2- $k=10$; 3- $k=9$; 4- $k=7$

Из полученных ВАХ видно, что увеличение значения коэффициента k при $c = const$ приводит к уменьшению величины x_2 и увеличению y_{min} . С увеличением величины параметра c характер изменения значений x_2 и y_{min} сохраняется (рис. 4).

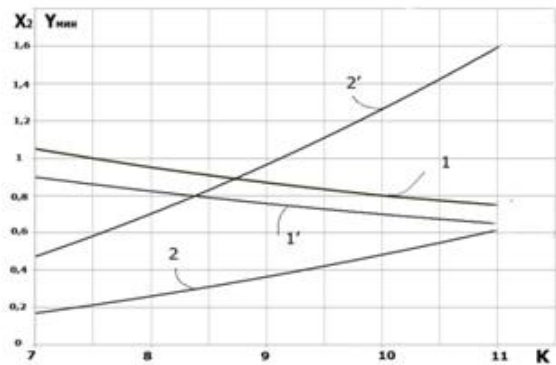


Рис. 4. Зависимость параметров y_{min} и x_2 от коэффициента kx_2 : 1 – $C=7$; 1' – $C=9$; y_{min} : 2 – $C=7$; 2' – $C=9$

Графики зависимостей $x_1 = f(c)$, $x_2 = f(c)$, $y_{min} = f(c)$ и $y_{max} = f(c)$ при фиксированном значении коэффициента k ($k = 7$) приведены на рис. 5, 6 и 7.

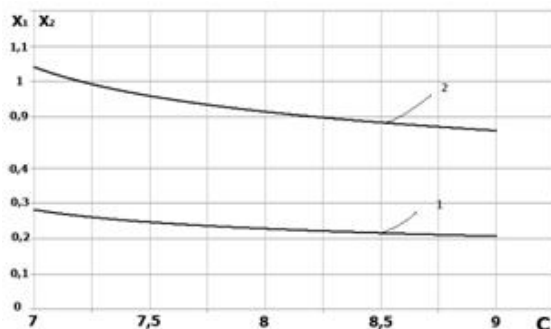


Рис. 5. Зависимость параметров x_1 и x_2 от значений C при $k=71-x_1$; $2-x_2$.

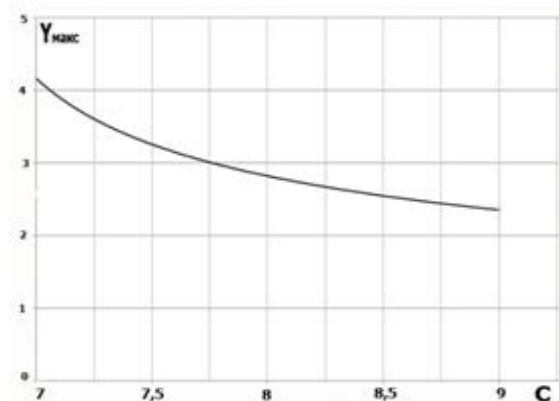


Рис. 6. Зависимость параметра y_{max} от значений C при $K=7$

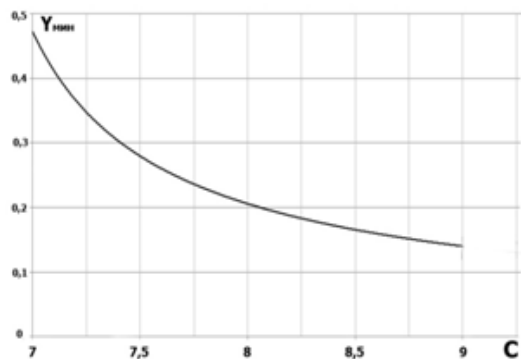


Рис. 7. Зависимость параметра y_{min} от значений C при $k=7$

Данные графиков показывают, что коэффициент c влияет на значения параметров U_{max} , U_{min} , x_1 и x_2 , причем с увеличением его значения ВАХ диода сдвигается в область малых значений x .

Следует отметить, что для формирования желаемой ВАХ необходимо исходить из справочных или экспериментальных данных U_{max} , U_{min} , x_1 и x_2 туннельного диода и на их основе определить соответствующие коэффициенты функции $y(x)$.

Библиографический список

1. Ямпурин, Н.П. Электроника: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений [Текст] / Н.П. Ямпурин, А.В. Баранова, В.И. Обухов. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 240 с.
2. Янчук, Е.В. Туннельные диоды в усилительных устройствах [Текст] / Е.В. Янчук. – М.: Энергия, 1967. – 56 с.
3. Дулин, В.Н. Электронные приборы: учебник для вузов [Текст] / В.Н. Дулин [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 496 с.

ANALYSIS AND MODELING OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF THE TUNNEL DIODE

© 2012 M. N. Piganov, V. D. Dmitriev, S. V. Tyulevin, A.V. Tokareva

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

The analysis of the tunnel diode are carried out, the equivalent circuit is considered, a direct branch of the current-voltage characteristics is simulated, the calculated dependences of the functions are submitted that make up the current-voltage characteristic.

The tunnel diode, the current-voltage characteristics, analysis, modeling.

Информация об авторах

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. Область научных интересов: надёжность и качество радиоэлектронных средств.

Дмитриев Василий Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kipres@ssau.ru. Область научных интересов: технология микросборок.

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

Кочкина 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. Область научных интересов: надёжность и качество радиоэлектронных средств.

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. Korolyov (National Research University). E-mail: piganov@ssau.ru. Area of scientific: quality and reliability of radio-electronic equipment.

Dmitriev Vasily Dmitrievich, candidate of technical sciences, assistant professor of design and production radio-electronic means, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kipres@ssau.ru. Area of scientific: technology of microassemblages.

Tyulevin Sergei Viktorovich, candidate of technical sciences, assistant professor of design and production radio-electronic means, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kipres@ssau.ru. Area of scientific: quality and reliability of space-based radioelectronic means.

Kochkina Alena Viktorovna, post-graduate student design and manufacture of electronic resources, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kipres@ssau.ru. Area of scientific: quality and reliability radio electronic means.

УДК 629.7.064

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ЗНАЧЕНИЙ ВЯЗКОСТИ И УРОВНЯ ЧИСТОТЫ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ

© 2012 М. А. Ковалёв, Г. В. Бородкин

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

Предложена диагностическая система для контроля технического состояния гидравлических систем летательных аппаратов в наземных условиях. В качестве диагностических признаков использованы значения дисперсного состава частиц загрязнения и вязкости рабочей жидкости. Разработаны математическая модель изменения технического состояния гидросистемы и алгоритм его диагностирования.

Надёжность гидравлических систем, система функциональной диагностики гидравлических систем, контроль значений вязкости и чистоты рабочей жидкости гидравлических систем, алгоритм диагностирования технического состояния гидравлических систем.

Известно, что существенная часть отказов оборудования летательных аппаратов (ЛА) приходится на элементы гидравлических систем (ГС), что обусловлено сложными условиями их работы [1]. Отказ одной или нескольких функциональных подсистем ГС ЛА может спровоцировать аварию или катастрофу. В связи с этим повышение надёжности ГС ЛА является актуальной научно-технической задачей.

Надёжность и долговечность агрегатов ГС находится в непосредственной зависимости от чистоты рабочей жидкости (РЖ) [1,2]. Загрязняющие вещества, содержащиеся в жидкости, попадают в зазоры между рабочими поверхностями скользящих пар гидроагрегатов и заклинивают их или оказывают абразивное действие, а также закупоривают различные жиклёрные и дроссельные каналы. Кроме того, мелкие частицы, попадая в РЖ ГС, способствуют разрыву масляной плёнки, ухудшают режим смазки и вызывают повышенное окисление жидкости.

Параметры частиц загрязнения РЖ являются одними из наиболее важных диагностических параметров при контроле технического состояния узлов ГС [3,4]. Исследования в области контроля технического состояния ГС показали, что даже в РЖ наиболее совершенных механизмов, какими являются изделия авиационной и космической техники,

практически всегда содержится множество различных по химическому составу и твердости частиц. Появление этих частиц свидетельствует о наличии процесса разрушения какого-либо узла ГС, что в конечном итоге может привести к её отказу. Контролируя параметры этих частиц, можно прогнозировать отказы ГС. Кроме того, повышенный уровень загрязнённости РЖ вызывает повышенный износ деталей гидропривода, ухудшение его эксплуатационных характеристик и преждевременный выход из строя.

В настоящее время разработана диагностическая система, которая позволяет прогнозировать состояние и остаточный ресурс как отдельных гидроагрегатов, так и всей ГС в целом [2]. В этой системе оценивается дисперсный состав частиц загрязнителей РЖ.

Однако на работоспособность ГС огромное влияние оказывает также значение вязкости РЖ. Так, для обеспечения требуемого уровня смазывающей способности, позволяющего агрегатам ГС функционировать в нормальном режиме, значение вязкости РЖ не должно быть ниже установленного техническими требованиями уровня. При этом известно [5], что вязкость большинства минеральных масел при длительной работе в условиях высоких давлений, в особенности при дросселировании жидкости с большим

перепадом давления и при смазке под давлением трущихся пар с высокой удельной нагрузкой, может значительно понизиться (примерно до 50% первоначального значения).

Поэтому, расширить диагностические способности известной системы контроля [2] можно, если включить в её состав устройство, позволяющее измерять значение вязкости.

В настоящее время в процессе эксплуатации ЛА для контроля значения вязкости РЖ используется метод отобранных проб, для которого характерен ряд существенных недостатков [2].

Для поддержания значения вязкости в требуемых пределах в процессе эксплуатации отечественных ЛА предусмотрена периодическая замена РЖ (полная или частичная). Такая замена обычно приурочивается к тяжёлой форме регламента или производится во время ремонта самолёта после отработки межремонтного ресурса (или ресурса до первого ремонта).

Существуют различные методы измерения вязкости жидкости [6]: капиллярный, вибрационный, ротационный, метод падающего шарика. Анализ [6,7] этих методов показал, что для измерения вязкости РЖ в разрабатываемой диагностической системе целесообразно использовать капиллярный вискозиметр ПКВ-901 (в дальнейшем ПКВ), разработанный в ОНИЛ – 16 СГАУ.

Прибор контроля вязкости типа ПКВ предназначен для автоматического контроля значения кинематического коэффициента вязкости РЖ жидкостных систем при температуре 50°C без отбора пробы жидкости из гидравлического оборудования, в том числе при контроле токсичных жидкостей. Основными достоинствами этого прибора являются возможность измерения вязкости непосредственно в потоке жидкости в режиме реального времени (нет необходимости прибегать к отбору проб), а также его высокая точность (относительная погрешность измерений составляет доли процента).

На рис. 1 представлена система функциональной диагностики ГС ЛА на базе подвижной гидравлической установки (ПГУ) с вискозиметром ПКВ в её составе. В этой системе оценивается дисперсный состав частиц загрязнения, вносимых в жидкость функциональными подсистемами ГС, и вязкость РЖ. ПГУ предназначена для периодического наземного обслуживания ГС ЛА. Эта установка представляет собой совокупность различных агрегатов и узлов, смонтированных в специальном кузове, установленном на автомобильном прицепе ТАПЗ-755. Установка имеет две ГС, снабженные насосами, регуляторами давления и расхода, контрольно-измерительными приборами, воздушной системой для поддавливания гидробаков.

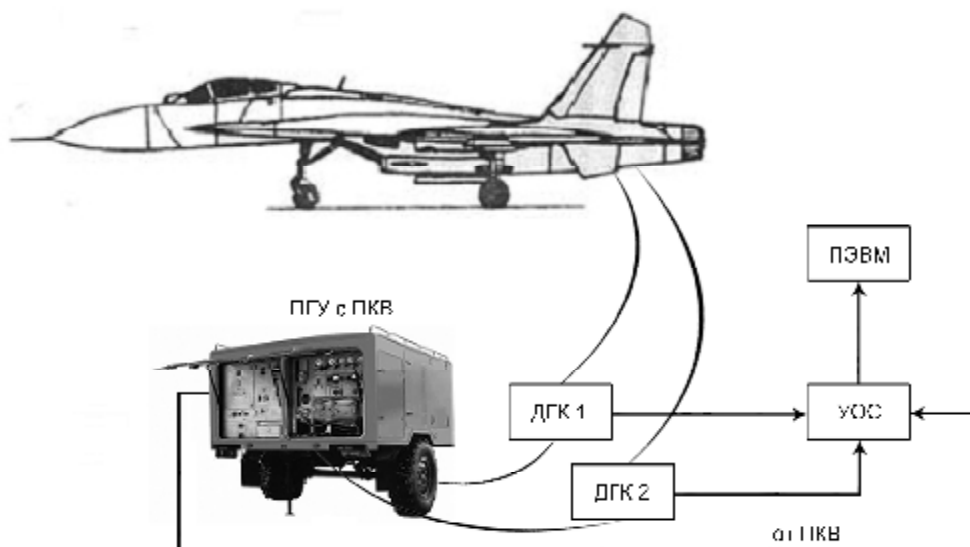


Рис. 1. Система функциональной диагностики ГС ЛА на базе ПГУ с вискозиметром ПКВ

Во время наземного обслуживания ГС ЛА при помощи диагностической системы периодически определяются значения дисперсного состава частиц загрязнения РЖ и её вязкости. Таким образом, по результатам нескольких измерений можно контролировать динамику изменения этих параметров. Для контроля дисперсного состава частиц загрязнения используется фотоэлектрический датчик встроенного контроля (ДВК) [8]. По разности показаний двух ДВК, установленных на входе и на выходе ПГУ, можно определить уровень загрязнений, вносимых в РЖ ПГУ или отдельными агрегатами ГС ЛА.

Предложенная система работает следующим образом: сигналы ДВК и ПКВ поступают в устройство обработки сигналов (УОС), где они преобразуются в форму, удобную для их дальнейшей обработки, регистрации и индикации. Преобразованные и оцифрованные сигналы подаются в ПЭВМ, которая реализует алгоритм диагностирования, рассмотренный ниже. Более детально состав устройства обработки сигналов и назначение его элементов рассмотрены в работе [9].

При построении системы функциональной диагностики ГС ЛА необходимо учитывать требования относительно условий ее функционирования. Согласно требованиям эксплуатирующих организаций температура контролируемой жидкости может достигать значения 100°C. Однако фотоэлектрические ДВК могут эксплуатироваться при температуре жидкости не превышающей 70°C. Поэтому установка таких датчиков непосредственно в основную магистраль ГС невозможна. Для контроля параметров рабочей жидкости ДВК предлагается установить в дополнительный гидравлический контур (ДГК)

с малым расходом жидкости. Структурная схема подобного контура [2] изображена на рис. 2.

Контур состоит из вентиля (В), двух настраиваемых дросселей (НД), теплообменника (ТО), в качестве которого можно применить радиатор или микрохолодильник с элементами Пельтье, ДВК и обратного клапана (ОК). Вентиль необходим для перекрытия гидравлического контура при снятии ДВК в целях его поверки или замены. НД необходим для снижения расхода жидкости до заданной величины. ТО предназначен для охлаждения жидкости до значения, не превышающего 70°C. Второй дроссель необходим для повышения давления РЖ в месте установки ДВК, что препятствует образованию пузырьков воздуха в анализируемой жидкости. Проанализированная жидкость поступает через ОК в линию слива (ЛС) или в гидробак.

Установка датчиков контроля параметров РЖ на находящиеся в эксплуатации ЛА требует выполнения сложных доработок ГС, на проведение которых необходимо решение на уровне генерального конструктора ЛА. Поэтому вопрос применения бортового варианта системы контроля ГС целесообразно рассматривать лишь при разработке новых образцов авиационной техники.

Для разработки алгоритма диагностирования представленной диагностической системы были использованы обобщённые уравнения [10]. В случае контроля значений двух параметров - дисперсного состава частиц загрязнения $N(t, d)$ и вязкости $\eta(t)$ (где t – время, а d – диаметр частиц) модель изменения технического состояния ГС ЛА будет иметь следующий вид:

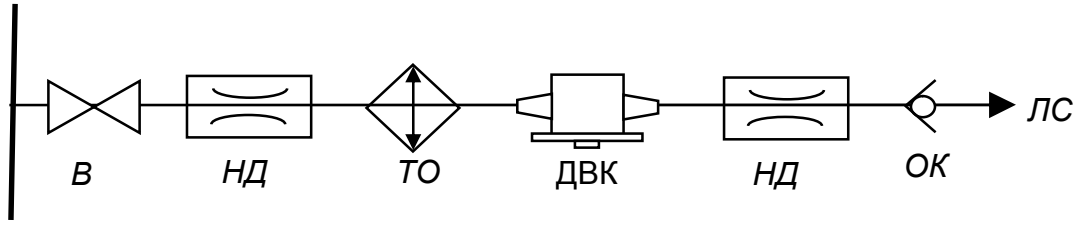


Рис.2. Структурная схема дополнительного гидравлического контура для установки ДВК

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{il}(t + \Delta t, d) = N_{il}(t, d) + \frac{dN_{il}(t, d)}{dt} \Delta t; \\ \Delta N_l(t + \Delta t, d) = \Delta N_l(t, d) + \frac{d(\Delta N_l(t, d))}{dt} \Delta t; \\ n_l(t + \Delta t) = n_l(t) + \frac{dn_l(t)}{dt} \Delta t, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $l=1, \dots, L$ – номер отдельной ГС в составе ГС ЛА; L – количество отдельных ГС в составе ГС ЛА; i – номер точки контроля значений $N(t, d)$ в отдельной ГС (при построении алгоритма (1) было принято, что в каждой отдельной ГС должны быть две точки контроля, то есть $i=1, 2$; тогда по разности показаний датчиков можно оценить дисперсный состав частиц загрязнения, вносимых в РЖ какими-либо агрегатами ГС); Δt – интервал времени между измерением значений параметров $N(t, d)$ и $v(t)$;

$$\Delta N_l(t, d) = N_{1l}(t, d) - N_{2l}(t, d).$$

Система уравнений (1) позволяет прогнозировать значения дисперсного состава частиц загрязнения РЖ и её вязкости на интервале времени Δt . Для вывода уравнений использовался математический аппарат рядов Фурье.

На основе системы уравнений (1) можно построить модель принятия решения о техническом состоянии ГС:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{il}(t, d) < N_{il}(d)_{np}; \\ \Delta N_l(t, d) < \Delta N_l(d)_{np}; \\ \frac{dN_{il}(t, d)}{dt} < N'_{il}(d)_{np}; \\ \frac{d(\Delta N_l(t, d))}{dt} < \Delta N'_l(d)_{np}; \\ v_l(t) \geq v_{l_{np}}; \\ \frac{dv_l(t)}{dt} \geq v'_{l_{np}}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Здесь $N_{il}(d)_{np}$, $N'_{il}(d)_{np}$ и $v_{l_{np}}$, $v'_{l_{np}}$ – предельно допустимые значения параметров

$N_{il}(t, d)$, $v_l(t)$, а также скоростей их изменения; $\Delta N_l(d)_{np}$, $\Delta N'_l(d)_{np}$ – аналогичные величины для параметра ΔN . Допуски определяются на основе значений, рассчитанных при помощи диагностических моделей ГС ЛА или определённых при помощи специальных испытательных процедур, методика построения и проведения которых описана в ряде работ, например [11].

Система уравнений (2) является алгоритмом диагностирования ГС ЛА. Ее можно назвать моделью контроля стабильности в работе ГС. Техническое состояние ГС стабильно, т.е. она работоспособна, если выполняются все условия, составляющие систему уравнений (2).

Таким образом, алгоритм определения технического состояния ГС ЛА на основе мониторинга двух параметров: дисперсного состава частиц загрязнения и уровня вязкости РЖ, приведённый в данной статье, позволяет принять решение о возможности дальнейшей эксплуатации ГС ЛА, а также необходимости выполнения каких-либо ремонтных работ. Применение данной диагностической системы на аэродромах и при испытаниях агрегатов и узлов ГС ЛА позволит перейти к техническому обслуживанию по состоянию, что существенно снизит затраты на эксплуатацию и уменьшит число отказов агрегатов и узлов ГС ЛА.

Следует отметить, что количество контролируемых параметров РЖ ГС может быть увеличено. Это позволит расширить диагностические возможности системы контроля технического состояния ГС ЛА. Количество и наименование анализируемых величин определяются исходя из возможностей исследователей по наблюдению их значений и

задач, решаемых при диагностировании конкретной ГС.

Библиографический список

1. Тимиркеев, Р. Г. Промышленная чистота и тонкая фильтрация жидкостей летательных аппаратов [Текст] / Р. Г. Тимиркеев, В. М. Сапожников. – М.: Машиностроение, 1986. – 152 с.
2. Ковалев, М. А. Встроенная система контроля уровня загрязнения рабочей жидкости гидросистем воздушных судов [Текст] / М. А. Ковалев, Л. М. Логвинов, И. И. Хабло // *Авиационная промышленность*. - М.: НИАТ. - 2009. - №1. - С.51-56.
3. Ковалев, М. А. Упреждающее обслуживание гидросистем воздушных судов [Текст] / М. А. Ковалев // *Полет*. – М.: Машиностроение. - 2009. - № 5. - С. 38–42.
4. Ковалев, М. А. Упреждающее обслуживание гидросистем на основе анализа параметров частиц загрязнения рабочей жидкости [Текст] / М. А. Ковалев // *Вестник Самарск. гос. аэрокосм. ун-та*. - 2009. - № 3 (19). - Ч.1. - С. 89-96.
5. Черненко, Ж. С. Гидравлические системы транспортных самолетов [Текст] / Ж. С. Черненко [и др.]. – М.: Транспорт, 1975. – 184 с.
6. Профос, П. Измерения в промышленности. Способы измерения и аппаратура. Книга №2 (Измерения в промышленности: Справ., изд. в 3-х кн. Кн. 2. Способы измерения и аппаратура: Пер. с нем.) [Текст] / Под ред. П. Профоса. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1990.
7. Малкин, А. Я. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения [Текст] / А. Я. Малкин, А. Е. Чалых. - М.: Химия, 1979. - 304 с.
8. Логвинов, Л. М. Техническая диагностика жидкостных систем технологического оборудования по параметрам рабочей жидкости [Текст] / Л. М. Логвинов. – М.: ЦНТИ «Поиск», 1992. – 91 с.
9. Ковалев, М. А. Микропроцессорное устройство для систем аппроксимативного анализа параметров рабочей жидкости гидросистем / М. А. Ковалев, Л. М. Логвинов, // *Ремонт, восстановление, модернизация*. - М.: Наука и технологии. - 2007. - № 4. - С. 43–46.
10. Ковалёв, М. А. Математическое обеспечение метода контроля технического состояния гидросистем воздушных судов по параметрам рабочей жидкости [Текст] / М. А. Ковалёв // *Известия СНЦ РАН*. – Самара: СНЦ РАН. - 2008. - Том 10. - №3 (25). - С. 858-864.
11. Fitch, E. C. Fluid contamination control [Текст] / E.C. Fitch // *Technology transfer Series #4, Oklahome, FFS, INC*. 1988. – 433 p.

CONTROL OF THE AIRCRAFT HYDRAULIC SYSTEM TECHNICAL CONDITIONS ON THE BASIS OF MONITORING VISCIDITY VALUES AND PURITY LEVEL OF FLUID POWER

© 2012 M. M. Kovalev, G. V. Borodkin

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

They offered the diagnostic system for the technical control condition of the aircraft hydraulic systems on the surface area. The values of dispersible particle composition of contamination and viscosity of fluid power are used as diagnostics signs. The mathematics model of the hydraulic system technical condition change and its diagnostics algorithm are worked out.

The hydraulic systems reliability, functional diagnostics of the hydraulic systems, the viscosity values and fluid power control of purity level the hydraulic systems, hydraulic systems technical conditions diagnostic algorithm.

Информация об авторах

Ковалёв Михаил Анатольевич, проректор по общим вопросам, доктор технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kovalev@ssau.ru. Область научных интересов: системы функциональной диагностики технического состояния жидкостных систем авиационной техники, функциональная диагностика гидравлических систем по параметрам частиц износа, контроль уровня загрязнения жидкостей при помощи датчиков встроенного контроля.

Бородкин Глеб Владимирович, аспирант военной кафедры, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: gleb-borodkin1985@yandex.ru. Область научных интересов: системы функциональной диагностики технического состояния жидкостных систем авиационной техники, функциональная диагностика гидравлических систем по параметрам частиц износа, контроль уровня загрязнения жидкостей при помощи датчиков встроенного контроля.

Kovalev Mikhail Anatolyevich, Vice President for General Affairs, doctor of technical sciences, associate professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kovalev@ssau.ru. Area of scientific: functional diagnosis of the technical state of aircraft fluid systems, functional diagnostics hydraulic parameters for the wear, contamination control fluids by sensors embedded control.

Borodkin Gleb Vladimirovich, post-graduate student of the military department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: gleb-borodkin1985@yandex.ru. Area of scientific: functional diagnosis of the technical state of aircraft fluid systems, functional diagnostics hydraulic parameters for the wear, contamination control fluids by sensors embedded control.

УДК 004.9

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ

© 2012 Л. С. Зеленко, Д. А. Загуменнов, А. О. Зинченко

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

Рассматриваются вопросы, связанные с разработкой виртуальной информационно-образовательной среды; обосновывается выбор проектных и программных решений, описываются структуры учебного курса и виртуального пространства.

E-learning, информационные и телекоммуникационные технологии, виртуальный мир, дистанционная обучающая система, трёхмерное пространство, веб-приложение, игровой движок Unity3D, база данных.

Введение

Бурное и постоянное развитие информационных технологий открывает перед образованием широкие возможности для инноваций. Дистанционное электронное обучение (e-learning) стало его неотъемлемой частью, LMS-системы (Learning Management System) активно используют даже те, кто имеет возможность регулярно встречаться со своими учениками (студентами, школьниками) лицом к лицу. Виртуальные информационно-образовательные среды (системы) – относительно новый вид обучающих систем, который объединяет в себе особенности традиционных систем обучения, электронных обучающих сред и достижения в области информационных технологий. Под информационно-образовательной средой обычно понимают «системно-организованную совокупность средств передачи данных, информационных ресурсов, протоколов взаимодействия, аппаратно-программного и организационно-методического обеспечения, ориентированную на удовлетворение образовательных потребностей пользователей» [1]. Виртуальные образовательные среды обеспечивают комплексную методическую и технологическую поддержку дистанционного образовательного процесса, включая обучение, управление образовательным процессом и его качество.

Средством технологической поддержки дистанционного обучения являются современные информационные и телекоммуникационные технологии, в первую очередь Интернет-технологии, они обеспечивают доступ к разнообразным информационным ресурсам и открывают новые возможности активного участия обучаемого в образовательном процессе. Интернет-революция 90-х годов 20 века и разработка Web 2.0 внесли в нашу жизнь понятие «виртуальное пространство», которое постоянно расширяется и занимает просторы WWW. Социальные исследования все больше указывают на то, что граница между виртуальным и реальным мирами стирается.

Преимущества трёхмерного виртуального пространства вытекают из особенностей человеческого восприятия информации. Согласно многочисленным исследованиям, 80% информации об окружающем мире человек получает через зрение, а зрение работает тем эффективнее, чем более образный мир оно видит. Преподаватели знают, что простой и наглядный пример зачастую оказывается эффективнее строгих теоретических выкладок. Текст требует вдумчивого прочтения и понимания, а яркая картинка или движение воспринимаются практически мгновенно. Самые популярные образовательные ресурсы в сети интернет (например, Khan Academy [2]) все больше полагаются на видео, а не текст.

Виртуальный мир может стать следующим шагом на пути к большей наглядности [3]. Он способен выступить в роли интегрированной среды, куда без особых трудностей можно перенести все уже освоенные формы подачи информации (будь то текст, иллюстрации, видео или что-то еще) и добавить любую сложную визуализацию, которую преподаватель использует в рамках своих курсов. Представление и форма подачи материала очень часто имеют первостепенное значение для обучаемых, в первую очередь школьников, – самые ценные знания могут так и остаться неувоенными, если к ним придется «продираться» сквозь нагромождения формулировок или монотонный рассказ преподавателя. И напротив – увлекательное повествование способно мгновенно захватить внимание слушателя, привлечь его к себе. «Перемножив» возможности передовых информационных технологий с педагогическим потенциалом, можно выстроить индивидуальный образовательный путь для каждого обучающегося с учётом его потребностей и особенностей восприятия и обработки информации.

Архитектура системы

Виртуальная образовательная среда «3Ducation», разрабатываемая на кафедре программных систем СГАУ, базируется на технологии клиент-сервер, ее архитектура представлена на рис. 1.

Клиентская часть системы представляет собой просто веб-браузер, который используется для просмотра страниц на сервере (пользователю только необходимо установить на своем компьютере небольшой плагин Unity Web Player). 3D-сцены виртуального мира интегрируются в HTML-страницы, поэтому обучаемый может перемещаться по виртуальному пространству точно так же, как по страницам обычных интернет-сайтов.

Серверная часть системы реализует архитектуру MVC, которая определяет три уровня:

- уровень представления веб-страниц портала;
- уровень бизнес-логики приложения и доступа к данным;
- уровень данных.

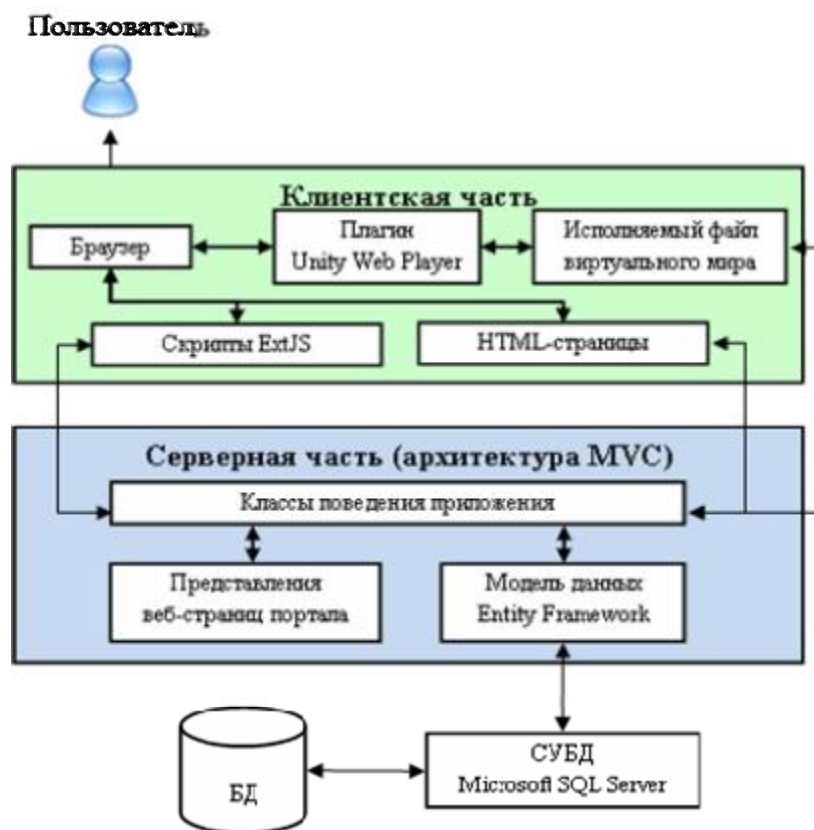


Рис. 1. Архитектура системы

В качестве протокола обмена данными по сети используется протокол TCP/IP. Четыре контроллера из группы поведения обслуживают четыре страницы сайта из группы представления. Главным компонентом модели (уровень данных) является контекст базы данных; в нём дается перечисление всех сущностных классов, включенных в модель, и через него работают с базой данных все контроллеры.

Технологическая поддержка образовательного процесса

Виртуальная обучающая система «3Ducation» широко использует возможности *технологии виртуальной реальности* (Virtual Reality) или виртуальных миров. Критерием выбора базовой технологии стала возможность интеграции виртуальных миров в браузер, которая бы обеспечила целостность системы. После тщательного анализа выбор был остановлен на бесплатной версии игрового «движка» Unity3D, создатели которого (компания Unity Technologies [4]) описывают его как «самый мощный бесплатный игровой движок». Уровень графических эффектов Unity3D превосходит O3D, и X3D, но куда более ценным фактом является его простота, удобство и стабильность. Графический редактор позволяет быстро моделировать геометрию сцены, не прибегая к написанию кода. Для импорта любого ресурса достаточно переместить соответствующий файл в папку с проектом. Большим достоинством Unity3D является внушительная коллекция готовых ресурсов - предметов обихода и моделей персонажей с готовым и гибко настраиваемым кодом, отвечающим за управление и движение камеры. С помощью движка Unity3D систему можно разработать быстро и в полном объеме, избежав неочевидных трудностей, способных затормозить или остановить работу.

Программные средства разработки. В число программных средств, выбранных для разработки системы, входят следующие среды и технологии [5]:

– среда разработки Microsoft Visual Studio 2010 и язык программирования C#;

– технология разработки веб-приложений ASP.NET 4.0;

– фреймворк ASP.NET MVC Framework 3.0;

– технология доступа к данным Entity Framework 4.0;

– система управления базами данных Microsoft SQL Server 2008;

– программное обеспечение для сервера IIS 7.5;

– JavaScript-библиотека ExtJS 4.0;

– среда разработки Unity Editor 3.4;

– трёхмерный графический редактор Blender 2.6.

Все они взаимно дополняют друг друга и в сумме предоставляют полный спектр возможностей, необходимый для реализации системы.

Ядро системы разработано с помощью фреймворка ASP.NET MVC Framework, который использует технологию ASP.NET от Microsoft, и позволяет создавать веб-приложения, предлагая пользователю структуру проекта, отвечающую принципам шаблона MVC (model-view-controller, модель-представление-поведение).

Internet Information Services (IIS) – стандартное решение от Microsoft для выполнения обмена информацией между сервером и клиентом, а также выполнения других функций клиент-серверных приложений. При развёртывании системы в распределенной среде это программное обеспечение должно быть установлено на серверной части системы.

ExtJS – крупная библиотека на языке JavaScript, упрощающая разработку сложных и высоко интерактивных веб-интерфейсов, которая поддерживает технологию AJAX, анимацию, работу с объектной моделью веб-документа (DOM), реализацию таблиц, вкладок, обработку событий, а также ряд сложных графических компонентов (например, диаграмм или дерева каталогов).

Редактор Unity Editor – это единая среда разработки, поддерживающая полный процесс создания виртуального мира. Построение трёхмерного пространства производится непосредственно внутри редактора, программирование логики – в интегрирован-

ной среде MonoDevelop на языках JavaScript или C#. Исключение составляет моделирование сложной геометрии: в Unity Editor возможно лишь создание графических примитивов (куб, цилиндр, сфера) и объединение их в группы; остальное необходимо импортировать из трёхмерных редакторов. Для этих целей выбран открытый и бесплатный 3D-редактор Blender.

Технологии хранения и манипулирования данными. Одна из основных функций системы – это обработка и хранение данных, а также корректное их отображение при генерации виртуального мира. Для этого используется технология доступа к данным Entity Framework, которая позволяет автоматически генерировать базу данных и все таблицы на основании созданных разработчиком сущностных классов и заполнять их первоначальными данными, если таковые были им определены. Данная технология контролирует все изменения, выполненные в ходе разработки системы, на уровне кода и при необходимости изменяет структуру базы данных. Выбор Entity Framework определил и выбор СУБД: Microsoft SQL Server 2008 также входит в семейство технологий от Microsoft и лучше других гарантирует безошибочную работу вышеописанных функций. Данные, необходимые для функционирования системы «3Ducation», хранятся в базе данных, кроме того, часть данных хранится на сервере в виде файлов.

Методическая поддержка образовательного процесса

Создание высококачественной и высокотехнологичной информационно-образовательной среды достаточно сложная техническая задача, но не нужно забывать, что для её развития и эксплуатации необходимо задействовать научно-методический, организационный и педагогический потенциал.

Структура учебного контента. Основной частью контента системы является учебный курс – совокупность текстовых и иллюстрационных материалов, сгруппированных по тематическим признакам. Струк-

тура курса имеет древовидную форму и представлена на рис. 2: корень дерева распадается на темы, состоящие из лекций и тестов; лекции разбиваются на параграфы, каждый из которых может обладать иллюстрациями; тесты включают ряд вопросов с различным количеством вариантов ответа, каждый из которых может быть верным или неверным. Варианты ответа могут быть представлены либо в текстовом формате, либо в виде изображения; кроме того, иллюстрацией может быть снабжен сам вопрос.

За разработку структуры учебного курса отвечает преподаватель, для этого в системе есть встроенный редактор курсов, предоставляющий интерфейс для редактирования, добавления или удаления любого элемента дерева. Кроме того, преподаватель имеет возможность загрузить учебный материал из файла MS Word: данные будут проанализированы и автоматически разбиты на нужные логические блоки (лекции – на параграфы, тесты – на вопросы и варианты ответов). Для этого преподавателю потребуется придать загружаемому документу требуемый формат (теоретический материал и тестовые задания должны быть оформлены в соответствии с заданным шаблоном). В случае, если анализатор допустит ошибку или неточность, в редакторе курсов всегда доступно ручное добавление, удаление и редактирование информации. Кроме того, преподаватель с помощью дополнительного графического редактора может проложить собственный путь на графе, тем самым задав иную последовательность соединения комнат: соединяя между собой различные задания (комнаты) и устанавливая характер связи между ними, в обучающем пространстве можно создать любое развитие сюжета (ограничение состоит лишь в количестве предусмотренных системой действий и условий). Поэтому достигать поставленную перед ним цель (или выяснять её в процессе) обучаемый может в соответствии со своими вкусами и предпочтениями, разными путями и способами, совершая ошибки и пробуя снова, по-другому.

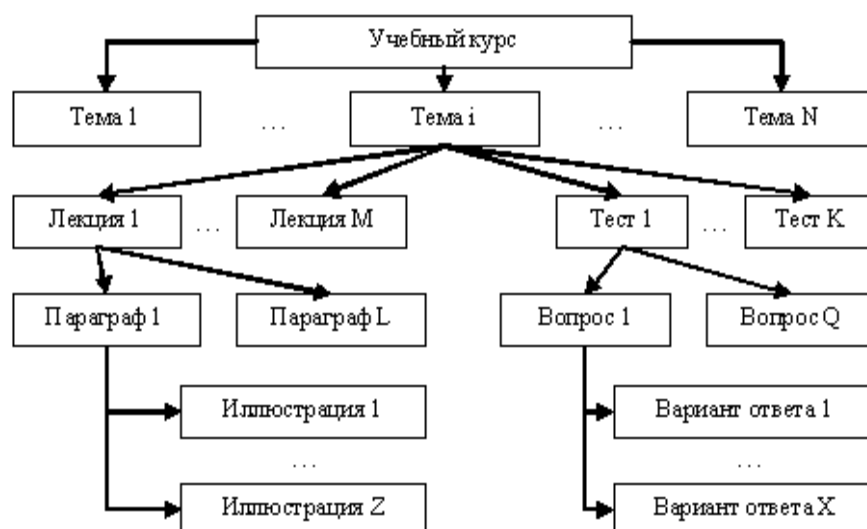


Рис. 2. Структура учебного курса

Таким образом, конструктор учебных курсов сочетает в себе возможности быстрой автоматической генерации и гибкой, интуитивно-понятной настройки курсов.

Игровой подход. В виртуальную образовательную среду, по мнению авторов, практически в равной мере должны быть включены как современные компьютерные технологии, так и элементы игры и обучения (см. рис. 3), в том числе постоянное поощрение, основанное на системе очков опыта из ролевых видеоигр: очками награждаются любые действия пользователя, начиная от незначительных второстепенных (чтение вводной информации, исследование мира) и заканчивая непосредственно учебными (чтение лекций, прохождение тестов). Это мотивирует обучаемого на новые конструктивные действия, награды определяют иную модель взаимодействия – игра дает человеку очень важное чувство постоянного прогресса и стимулирует его не останавливаться на достигнутом.

При разработке виртуального мира учитывались и аспекты когнитивной теории. Здесь обучаемый (игрок) – в центре внимания, и может получать знания по разным модальностям – текст, изображение, звуки и т. п. Обучаемый оценивает и анализирует игровые проблемы и задачи. Обучение реализуется через действие, которое включает непосред-

ственное обучение, наблюдение и рефлексию, выведение абстрактных понятий и связей (приобретение опыта, опирающегося на теорию) и активное экспериментирование при решении разнообразных задач и принятии решений. Система обладает высокой степенью интерактивности: обучаемый не только видит мир, но и активно с ним взаимодействует – перемещает предметы, нажимает на кнопки, решает задачи. Способность к усвоению информации в таких условиях возрастает многократно.

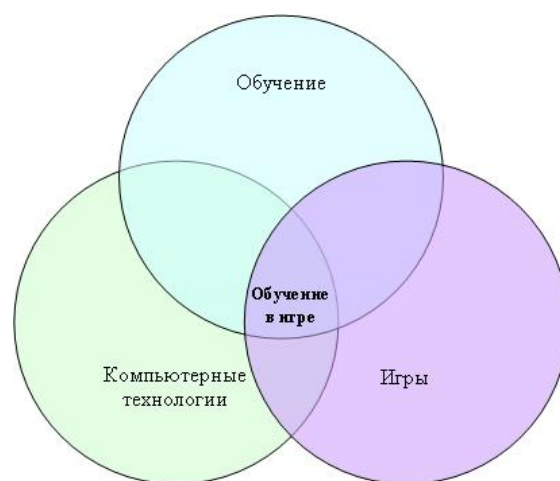


Рис. 3. Соотношение педагогики, компьютерных технологий и игр

Структура виртуального пространства

Трёхмерное обучающее пространство состоит из двух частей: постоянной и динамической. Постоянная часть оформлена в виде холла, содержит вводную информацию об университете, факультетах, кафедре и разработчиках, а также включает терминал для выбора курса из списка всех доступных учебных курсов. Динамическая часть представляет собой набор связанных комнат/коридоров и генерируется автоматически на основе структуры выбранного курса и комнат-шаблонов, внутрь которых загружается конкретное содержание. Пример схемы трёхмерного обучающего пространства представлен на рис. 4.

Взаимодействие пользователя с объектами виртуального мира осуществляется через персонажа-аватара – трёхмерную модель, с которой будет ассоциировать себя обучаемый и которым будет непосредственно управлять при исследовании учебного пространства. Система отслеживает все действия аватара (обучаемого), накапливает и отображает статистику действий, включая проведенное в мире время, число пройденных тестов и верных ответов на вопросы,

процент завершения курса/темы и т.п.

На основе этого вычисляется прогресс обучаемого внутри трёхмерного пространства и сохраняется в базе данных.

Заключение

Виртуальная информационно-образовательная среда «3Ducation» разрабатывается на кафедре программных систем СГАУ и предназначена для дистанционного обучения школьников средних и старших классов базовому курсу «Информатика». Система обеспечивает единый интерактивный способ доступа к информационным ресурсам как со стороны преподавателя, так и со стороны обучаемого, с ее помощью можно повысить эффективность приобретения знаний, умений и навыков (как индивидуальных, так и социальных).

Перспективы развития. В системе планируется реализовать:

– полноценную обратную связь и экспертные элементы, с помощью которых система сможет адаптироваться под успехи или неудачи конкретного пользователя и выдавать ему актуальные рекомендации, тем самым делая процесс обучения более индивидуальным и интеллектуальным;

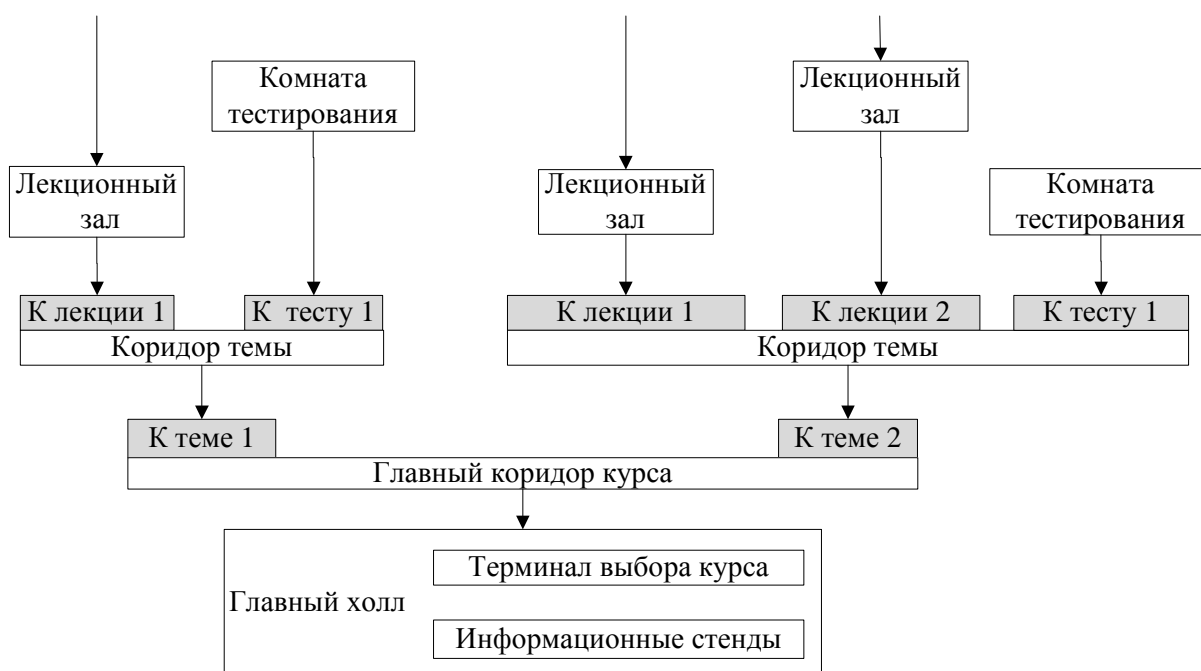


Рис. 4. Структура трёхмерного обучающего пространства

– режим соревнования (грамотное сочетание поощрения и соревнования может повысить эффективность процесса обучения);

– сетевое взаимодействие обучаемых и командную работу (стандартные образовательные курсы во многом остаются индивидуальным делом, при этом умение взаимодействия с коллегами в современном мире незаменимо: серьезные задачи слишком объемны для одиночек и требуют грамотного распределения труда);

– перевод системы на платформу мобильных устройств (iOS, Android и др.), что позволит перенести образовательный процесс в обычную аудиторию или класс, изменить формы подачи учебного материала и способы доступа к нему, а также улучшить информационный обмен между обучаемым и преподавателем.

Библиографический список

1. Концепции создания и развития единой системы дистанционного образования в России [Электронный ресурс]. – URL: http://www.e-joe.ru/sod/97/2_97/st064.html.

2. Официальный сайт Khan Academy [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.khanacademy.org>.

3. Зеленко, Л.С. Виртуальная реальность и игровой подход как основы построения трёхмерного обучающего пространства [Текст] / Л.С. Зеленко// Материалы VIII международной научно-практической конференции «Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий (ИНФО-2012)»/ под. ред. В.Г. Домрачева, С.У. Увайсова. – М.: МИЭМ, 2012. – С. 56-59.

4. Официальный сайт Unity3D [Электронный ресурс]. – URL: <http://unity3d.com/company/>.

5. Зеленко, Л.С. Принципы разработки виртуальной обучающей системы «3Ducation» [Текст] / Л.С. Зеленко, Д.А. Загуменнов // Сборник избранных трудов VII Международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии и ИТ-образование». Под ред. проф. В.А. Сухомлина. – М.: ИНТУИТ.РУ, 2012. – С. 326 - 333.

BUILDING FOUNDATIONS OF VIRTUAL INFORMATION-BASED EDUCATIONAL ENVIRONMENT

© 2012 L. S. Zelenko, D. A. Zagumennov, A. O. Zinchenko

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

The article covers the development process of virtual information-based educational environment, substantiates the choice of design and program solutions, describes the structures of learning course and virtual three-dimensional space.

E-learning, information technologies and telecommunications, virtual world, distance learning system, three-dimensional space, web-application, Unity3D game engine, database.

Информация об авторах

Зеленко Лариса Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры программных систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: Lzelenko@rambler.ru. Область научных интересов: e-learning, применение информационных технологий в образовании, проектирование и разработка сложных программных систем, в том числе систем дистанцион-

ного обучения, web-приложений, автоматизированных систем обработки информации и управления, технологии программирования и проектирования, информационные технологии.

Загуменнов Дмитрий Александрович, аспирант кафедры программных систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sndp@mail.ru. Область научных интересов: информационные технологии, e-learning, применение информационных технологий в образовании, проектирование и разработка баз данных и сложных программных систем, в том числе систем дистанционного обучения, web-приложений.

Зинченко Алексей Олегович, магистрант 2 года обучения направления «Фундаментальные информатика и информационные технологии», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: a.zintus@gmail.com. Область научных интересов: информационные технологии, проектирование и разработка баз данных, web-приложений, распределенных систем.

Zelenko Larisa Sergeevna, candidate of technical sciences, assistant professor at the Department of Computer Systems. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: lzelenko@rambler.ru. Area of scientific: e-learning, application of information technologies in education, design and development of complex computer systems, including distance learning systems, web-applications, and control computer-aided systems, programming and design techniques, information technologies.

Zagumennov Dmitry Alexandrovich, post-graduate student at the Department of Computer Systems. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: sndp@mail.ru. Area of scientific: information technologies, e-learning, application of information technologies in education, design and development of databases and complex computer systems, including distance learning systems and web-applications.

Zinchenko Alexei Olegovich, master's degree student (second year of study) in Fundamental Computer Science and Information Technologies. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: a.zintus@gmail.com. Area of scientific: information technologies, database design, web-applications and distributed systems development.

УДК 621.3.088.7

АВТОКАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ПО ВХОДУ КАНАЛА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

© 2012 Л. Э. Вилоп

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

Рассматривается автокалибровка канала преобразования электрических величин по двухэлементному имитатору выходной электрической величины датчика в измерительной системе с нелинейными датчиками.

Автокалибровка, автоматическая коррекция погрешности измерительной системы, нелинейный датчик.

После градуировки измерительного канала по входу датчика при условии неизменности параметров окружающей среды в погрешности измерения отсутствует дополнительная погрешность. Очевидно, что если градуировку измерительного канала производить автоматически перед каждым измерением, то в погрешности измерения составляющая дополнительной погрешности будет отсутствовать. Этот процесс получил название автокалибровки или автоматической коррекции погрешностей.

Однако, автокалибровка по входу датчика (по входу измерительного канала) может быть реализована только в тех случаях, когда есть возможность отключения измеряемой величины от входа измерительного канала и подключения вместо неё многозначной меры измеряемой величины. Примером такой системы с однозначной мерой является весоизмерительная система, в которой перед каждым или перед несколькими взвешиваниями производится отсчёт выходного кода АЦП в отсутствии взвешиваемого груза. При последующем вычитании этого кода из кода, получаемого при взвешивании, устраняется (до известного предела, определяемого погрешностью квантования) аддитивная составляющая погрешности измерения. Таким же образом, отсчётом выходного кода АЦП при нулевом нагружении удаётся уменьшить аддитивную составляющую погрешности измерительной системы для прочностных испытаний [1].

В большинстве же случаев даже такая

аддитивная автокалибровка по входу измерительного канала не представляется возможной, так как кроме проблемы отключения-подключения измеряемой величины существует ещё проблема наличия в измерительном устройстве меры измеряемой величины требуемой точности и удобства её воздействия на датчики, например, на датчики температуры.

Поэтому в современных многоканальных (многоточечных) измерительных системах (рис. 1) с коммутацией измерительных каналов по входу общего для всех датчиков канала преобразования электрических величин (КПЭВ), включающего в себя нормализатор, схему питания измерительных цепей и АЦП, по возможности, используют автокалибровку по мере, воспроизводящей значе-

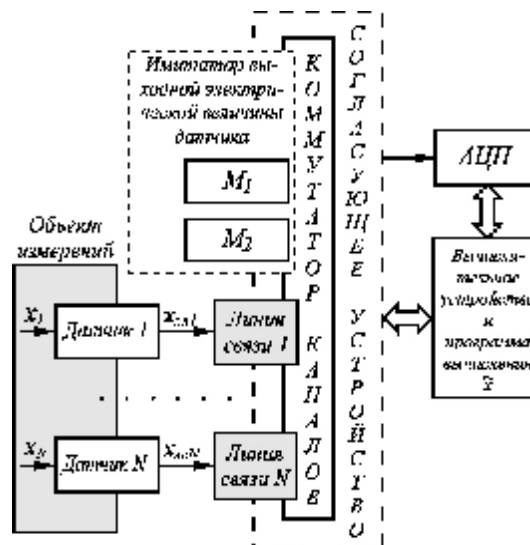


Рис. 1. Функциональная схема измерительной системы с автокалибровкой по входу КПЭВ

ния выходной электрической величины датчика в точках градуировки. Для этого в коммутатор каналов вводят дополнительные калибровочные каналы, посредством которых выходы такого прецизионного имитатора выходной электрической величины (ИВЭВ) датчика периодически или по внешней команде подключаются ко входу КПЭВ для получения калибровочных значений цифровых кодов на выходе АЦП, записываемых в память вычислительного устройства. Естественно, что в этом случае датчик оказывается неохваченным автокалибровкой и его погрешность ($\Delta_{дат}$) входит в погрешность измерения (Δ_x) измеряемой величины x , но погрешность КПЭВ ($\delta_{КПЭВ}$), за исключением погрешности квантования ($\Delta_{кв}$), исключается из погрешности измерения полностью, то есть:

$$D_x = D_{дат} + D_{ИД} + D_{кв}, \quad (1)$$

где $\Delta_{ИД}$ – погрешность, вносимая в результат измерения имитатором выходной электрической величины датчика (мерой сопротивлений, напряжений и т.д.). Хотя, в таких системах как весоизмерительная и система для прочностных испытаний [1], есть возможность исключить из погрешности измерения аддитивную составляющую погрешности всего канала преобразования, включая датчик.

Функция преобразования КПЭВ современных измерительных систем с точностью до погрешности квантования практически линейна. Поэтому при линейной функции преобразования датчика значение измеряемой величины x (оценка \tilde{x}) может быть вычислено по формуле, получаемой (рис. 2) из подобия прямоугольных треугольников ABC и ADE : $\frac{CA}{BC} = \frac{EA}{DE}$ или $\frac{x - x_1}{n - n_1} = \frac{x_2 - x_1}{n_2 - n_1}$.

Откуда значение оценки \tilde{x} :

$$\tilde{x} = (n - n_1) \frac{x_2 - x_1}{n_2 - n_1} + x_1, \quad (2)$$

где n – текущее значение выходного кода АЦП; x_1 и x_2 – точки градуировки, значения x , соответствующие, как правило, минимальному и максимальному значению из-

меряемой величины; n_1 и n_2 – соответствующие точкам градуировки значения выходных кодов АЦП.

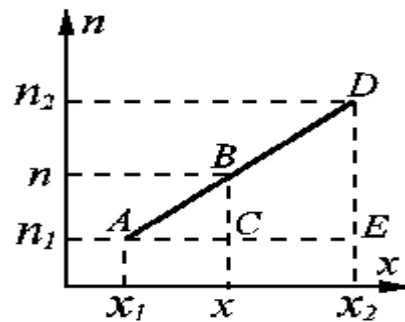


Рис. 2. К определению x при линейном датчике

Если для получения кодов n_1 и n_2 использовать опрос калибровочных каналов по мерам M_1 и M_2 имитатора выходной электрической величины используемых в системе датчиков, а значения x_1 и x_2 определить по функции обратной функции преобразования датчиков, используемых в системе ($x_1 = x_{M_1} = f_{дат}^{-1}(M_1)$ и $x_2 = x_{M_2} = f_{дат}^{-1}(M_2)$), и внести их при настройке измерительной системы в память вычислительного устройства, то необходимость в процедуре градуировки системы отпадает и значение измеряемой величины x вычисляется по формуле:

$$\tilde{x} = (n - n_{M_1}) \frac{x_{M_2} - x_{M_1}}{n_{M_2} - n_{M_1}} + x_{M_1}, \quad (3)$$

где n_{M_1} и n_{M_2} – значения выходных кодов АЦП, получаемые при опросе мер M_1 и M_2 имитатора выходной электрической величины датчика.

При нелинейной функции преобразования датчика (рис. 3) для уменьшения влияния нелинейности на погрешность измерения в современных измерительных системах используют кусочно-линейную аппроксимацию функции преобразования, при которой помимо точек градуировки x_{min} и x_{max} производят градуировку в точках x_i внутри

диапазона изменения измеряемой величины. При этом погрешность аппроксимации уменьшается с увеличением числа точек градуировки до известного предела, обусловленного погрешностью квантования используемого в системе АЦП.

Значение измеряемой величины \tilde{x} в этом случае вычисляется по формуле, аналогичной формуле (2):

$$\tilde{x} = (n - n_i) \frac{x_{i+1} - x_i}{n_{i+1} - n_i} + x_i, \quad (4)$$

где интервал (n_i, n_{i+1}) при работе системы определяется программным путём по текущему значению кода n на выходе АЦП.

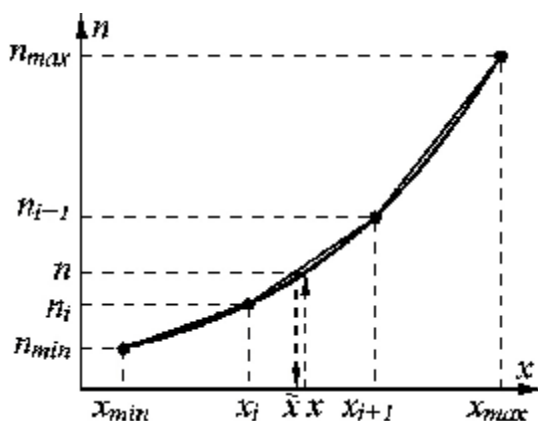


Рис. 3. К определению \tilde{x} при нелинейном датчике

Автокалибровка по входу КПЭВ в этом случае требует применения в системе многозначной меры выходной электрической величины датчика [2], воспроизводящей все точки градуировки $(x_{min}, \dots, x_i, \dots, x_{max})$. Такая многозначная мера вследствие технологических отклонений M_i от номинальных значений может внести в результат измерения свою погрешность нелинейности, а кроме того, большое число используемых в имитаторе выходной электрической величины датчика прецизионных элементов увеличивает стоимость и массогабаритные характеристики устройства.

Двухзначную меру M_1 и M_2 в ИВЭВ при нелинейной функции преобразования датчика можно использовать, если аддитивную составляющую погрешности КПЭВ ис-

ключать по мере M_1 , путем вычитания калибровочного кода n_{M_1} из текущего кода n , а для исключения мультипликативной составляющей погрешности КПЭВ стабилизировать его коэффициент преобразования по разности результатов опроса $n_{M_2} - n_{M_1}$ путём изменения одного из параметров КПЭВ, например, тока питания терморезисторного датчика или опорного напряжения АЦП. Такой подход требует введения в измерительную систему схемы с корректирующим цифроаналоговым преобразователем.

Вместе с тем, в структуре системы с автокалибровкой по двум значениям M_1 и M_2 можно ничего не менять при переходе от датчика с линейной функцией преобразования к датчику с нелинейной функцией преобразования, например, при увеличении диапазона измеряемых температур платиновым терморезистором или термопарным датчиком. Такое заключение основывается на том, что под воздействием дестабилизирующих факторов изменяются только параметры КПЭВ, функция преобразования которого линейна. Характер нелинейности датчика при этом остаётся неизменным, и её влияние сводится к пренебрежимо малой величине кусочно-линейной аппроксимацией, а аддитивные и мультипликативные изменения функции преобразования датчика всё равно не охватываются автокалибровкой по входу КПЭВ и в соответствии с формулой (1) входят в погрешность измерения D_x .

В соответствии с рис. 4 для значения выходного кода АЦП в любой i -й точке градуировки можно записать:

$$n_i = S_i(x_i - x_{min}) + n_{min}, \quad (5)$$

где $S_i = \frac{n_i - n_{min}}{x_i - x_{min}}$. Умножив и разделив S_i

на разность значений выходной электрической величины датчика $x_{эi} - x_{эmin}$, полу-

$$\text{чим: } S_i = \frac{x_{эi} - x_{эmin}}{x_i - x_{min}} \frac{n_i - n_{min}}{x_{эi} - x_{эmin}} = S_{\partial i} S_{эi},$$

где $S_{\partial i} = \frac{x_{эi} - x_{эmin}}{x_i - x_{min}}$ и $S_{эi} = \frac{n_i - n_{min}}{x_{эi} - x_{эmin}}$ –

некоторые интегральные коэффициенты

преобразования, соответственно, датчика и КПЭВ на интервале (x_{min}, x_i) .

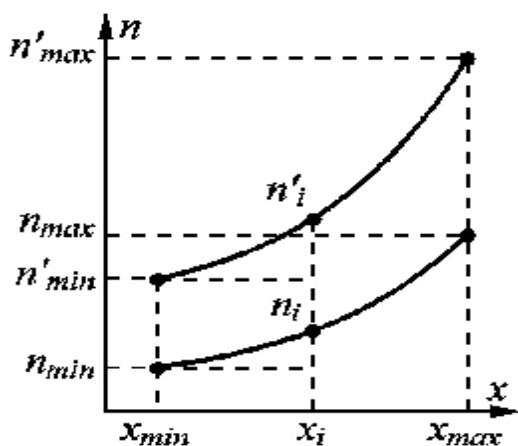


Рис. 4. К определению откорректированных значений отсчётов n'_i

Вследствие того, что функция преобразования КПЭВ линейна, значение $S_{\partial i}$ неизменно на всём интервале $(x_{\partial min}, x_{\partial max})$ и может быть определено как:

$$S_{\partial} = \frac{n_{max} - n_{min}}{x_{\partial max} - x_{\partial min}}.$$

Тогда формулу (5) можно записать в виде:

$$n_i = S_{\partial i} S_{\partial} (x_i - x_{min}) + n_{min}. \quad (6)$$

Под воздействием дестабилизирующих факторов значения $S_{\partial i}$, как отмечено выше, остаются неизменными, а значение S_{∂} и значения кодов n_i , n_{min} и n_{max} на выходе АЦП изменяются и становятся равными S'_{∂} , n'_i , n'_{min} и n'_{max} . Тогда формулу (6) можно записать в виде:

$$n'_i = S_{\partial i} S'_{\partial} (x_i - x_{min}) + n'_{min}, \quad (7)$$

где $S'_{\partial} = \frac{n'_{max} - n'_{min}}{x_{\partial max} - x_{\partial min}}$. Умножив и разделив первое слагаемое в правой части формулы (7) на S_{∂} , можем записать:

$$n'_i = S_{\partial i} S_{\partial} (x_i - x_{min}) \frac{S'_{\partial}}{S_{\partial}} + n'_{min},$$

$\frac{S'_{\partial}}{S_{\partial}} = \frac{n'_{max} - n'_{min}}{n_{max} - n_{min}}$, а в соответствии с форму-

лой (6) $S_{\partial i} S_{\partial} (x_i - x_{min}) = n_i - n_{min}$. Тогда окончательное выражение для расчёта значений отсчётов n'_i , скорректированных по результатам опроса M_1 и M_2 , принимает вид:

$$n'_i = (n_i - n_{min}) \frac{n'_{max} - n'_{min}}{n_{max} - n_{min}} + n'_{min}. \quad (8)$$

Таким образом, при использовании датчиков с нелинейной функцией преобразования в измерительной системе с автокалибровкой по имитатору выходной электрической величины датчика с двумя значениями меры M_1 и M_2 , градуировка с использованием внешней многозначной меры выходной электрической величины датчика в точках x_i внутри диапазона является обязательной процедурой. При этом для получения отсчётов n_{min} и n_{max} используются меры M_1 и M_2 , для которых по функции, обратной функции преобразования датчика, определяются значения точек градуировки $x_{min} = f_{\partial am}^{-1}(M_1)$ и $x_{max} = f_{\partial am}^{-1}(M_2)$.

Значения отсчетов $(n_{min}, \dots, n_i, \dots, n_{max})$, полученные при градуировке системы, используются для расчёта по формуле (8) скорректированных значений отсчётов $(n'_{min}, \dots, n'_i, \dots, n'_{max})$ после каждого опроса калибровочных каналов с мерами M_1 и M_2 , проводимого для получения значений n'_{min} и n'_{max} . Вместе с точками градуировки $(x_{min}, \dots, x_i, \dots, x_{max})$ значения отсчётов $(n_{min}, \dots, n_i, \dots, n_{max})$ должны храниться в памяти вычислительного устройства в течение всего времени эксплуатации измерительной системы до проведения следующей градуировки, в процессе которой они будут обновлены.

Значение измеряемой величины \tilde{x} при эксплуатации измерительной системы с такой автокалибровкой определяется по формуле, аналогичной (4):

$$\tilde{x} = (n - n'_i) \frac{x_{i+1} - x_i}{n'_{i+1} - n'_i} + x_i, \quad (9)$$

где n – текущее значение выходного кода

АЦП; n'_i и n'_{i+1} – значения отсчётов в точках градуировки, скорректированные по формуле (8).

Библиографический список

1. Вилоп, Л. Э. Измерительная система для прочностных испытаний элементов авиационных конструкций [Текст] / Л. Э. Вилоп // Перспективные информа-

ционные технологии для авиации и космоса (ПИТ-2010): избр. тр. Междунар. конф. с элементами науч. школы для молодежи. – Самара: Изд-во СГАУ, 2010. – С. 34-37.

2. Алиев, Т. М. Автоматическая коррекция погрешностей цифровых измерительных приборов [Текст] / Т. М. Алиев, Л. Р. Сейдель. – М.: Энергия, 1975. – 216 с.

AUTOCALIBRATION MEASURING CHANNEL ON THE INPUT CHANNEL CONVERSION ELECTRIC VALUES

© 2012 L. E. Vilop

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

Considered autocalibration channel conversion of electrical quantities in two-element simulator output power value of the sensor in the measuring system with nonlinear sensors.

Automatic calibration, automatic error correction measurement system, the nonlinear sensor.

Информация об авторах

Вилоп Леонард Эдуардович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: vilsgau@mail.ru. Область научных интересов: схемотехника и метрология измерительных систем и устройств.

Vilop Leonard Eduardovich, candidate of technical sciences, assistant professor at the Department of information systems and technology, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: vilsgau@mail.ru. Area of scientific: the circuit design and metrology measuring systems and devices.

РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕРИФИКАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ К УПРАВЛЯЮЩИМ АЛГОРИТМАМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ВИЗУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

© 2012 А. В. Шулындин, А. А. Тюгашев

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

В статье описываются проблемы создания корректных алгоритмов для управления космическими аппаратами. Приводятся математические модели управляющих алгоритмов реального времени, верификации, выявляется проблема верификации требований к ним и описывается работа автоматизированной системы визуального проектирования, реализующей модель верификации.

Управляющий алгоритм, верификация, функциональная задача, математическая модель, энергопотребление, пролог, тестирование.

Введение

Ключевую роль при управлении современными космическими аппаратами (КА) играют бортовые вычислительные системы (БВС), в состав которых входят одна или несколько бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ). На них возлагаются задачи контроля работоспособности бортовой аппаратуры (БА), управления движением КА и навигации, выдачи управляющих воздействий на БА при решении КА целевых задач. Функции управления реализуются при этом бортовым программным обеспечением (БПО). Среди ошибок БПО значительное количество приходится на сбои синхронизации и согласования логики управления БА при одновременном функционировании ряда бортовых систем и программ БПО в рамках решения КА целевых задач (ошибки в управляющих алгоритмах реального времени – УАРВ) [1].

Так как полное тестирование сформированной программы будет очень дорогостоящим и займет много времени, то для повышения уровня надежности (УАРВ) для БВС КА могут быть использованы аналитические методы верификации, которые на основе логически строгого доказательства способны определять наличие или отсутствие.

Как известно, верификация – это процесс доказательства соответствия между программной реализацией задачи и спецификацией задачи. Цель верификации – демонстрация свойства корректности программы. Для

программы управления КА важна верификация требований управляющих алгоритмов, потому что от правильно заданных требований зависит успешное выполнение функций, возложенных на управляющую программу.

1. Теоретический анализ

1.1 Математическая модель управляющих алгоритмов реального времени

Модель семантики УАРВ может быть построена как набор кортежей (четверок) Φ_i :

$$УАРВ = \{ \Phi_i \}, \Phi_i = \langle f_i, t_i, \tau_i, \bar{l}_i \rangle, i = \overline{1, N},$$
(1), где f_i – идентификатор функциональной задачи (ФЗ); t_i – момент начала выполнения ФЗ (целое неотрицательное число); τ_i – длительность ФЗ (целое неотрицательное число); \bar{l}_i – логический вектор, обуславливающий ФЗ [2].

Каждый кортеж Φ_i описывает одно действие (функциональную задачу), производимое управляющим алгоритмом. Φ_i обычно подразумевает работу какого-то прибора или агрегата, входящего в состав БА, или выполнение функциональной программы из комплекса БПО. При этом функциональная задача может выполняться не мгновенно, а на протяжении интервала времени τ_i , начиная с момента t_i . Осуществление тех или иных действий не носит безусловного характера, а должно соответствовать текущей ситуации на борту КА, которая описывается набором значений логических переменных $\langle \alpha_1, \dots, \alpha_k \rangle$, формирующих логический вектор.

Таким образом, выполнению ФЗ в момент времени t_i сопоставляется логический вектор, обуславливающий данное действие. Значение каждой из логических переменных (ЛП), обуславливающих выполнение ФЗ, принадлежит множеству $\{1, 0, N\}$. Здесь 1 обозначает ИСТИНУ, 0 – ЛОЖЬ, N в соответствующей компоненте логического вектора подразумевает, что выполнение ФЗ не зависит от значения данной логической переменной.

Базовое исчисление УА строится как формальная теория со следующим описанием.

Каждый объект исчисления есть формализованное описание целевой задачи. На базовом множестве элементов вводятся бинарные операции: \rightarrow – следования, CH – совпадения по началу, CK – совпадения по концу, + – операция выбора динамического объекта; унарные операции: \Rightarrow – «навешивания» предиката на терм (создание динамического объекта), IN, OUT – операции «навешивания» входных и выходных переменных на терм.

Множество термов исчисления определяется рекурсивно:

1. Символ элемента системы есть терм.
2. Если a – предикат, а T_1, T_2 – термы, то $T_1 \textcircled{R} T_2, T_1 \text{CH} T_2, T_1 \text{CK} T_2, (a) \text{P} T_1 + (\neg a) \text{P} T_2$ – термы [1].

Задача верификации для математической модели УАРВ заключается в определении истинности конъюнкции предикатов (операций) от термов (элементов системы) на некотором временном базисе.

1.2 Модель верификации требований

Модель верификации требований можно представить следующим образом:

$$V = (УАРВ, \Omega_F, \bar{l}, E_M), \quad (2)$$

где: УАРВ представляет собой математическую модель управляющих алгоритмов реального времени, описанную выше. УАРВ = $\{\Phi_i\}$, $\Phi_i = \langle f_b, t_b, \tau_b, \bar{l}_i \rangle, i = \overline{1, N}$; Ω_F является множеством связей между функциональными задачами Φ_i .

$$\Omega_F = \{\Omega_{Fi}\} i = \overline{1, M}; \quad (3)$$

\bar{l} – вектор логических переменных, описывающий состояние системы.

$$\bar{l} = \{\alpha_i\} i = \overline{1, K}; := \overline{1, M}; \quad (4)$$

E_M – максимально допустимое энергопотребление системы.

$$E_M \geq \sum_{i=1}^N E_{\phi}(\hat{O}_i) = \overline{1, M}, \quad (5)$$

где E_{ϕ} – функция энергопотребления для i -й функциональной задачи.

Верификация требований должна решать следующие задачи:

1. Определение допустимости спецификации для данного временного базиса при заданном состоянии системы с выбранным максимально допустимым энергопотреблением.

2. Определение пары конфликтующих между собой связей.

3. Нахождение такого временного базиса, на котором спецификация требований будет выполняема.

Введем понятие функции верификации множества. Функция верификации f_{ar} некоторого множества Ω есть конъюнкция всех его элементов:

$$f_{ar}(\Omega) = \Omega_i \wedge \Omega_j, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, N}, i \neq j,$$

$$\Omega = \{\Omega_i\} i = \overline{1, M}. \quad (6)$$

Данная функция является предикатом от одного терма, результатом будет являться выполнимость множества или его невыполнимость. Рассмотрим данную функцию на примере множества связей между функциональными задачами $\Omega_F = \{\Omega_{Fi}\}$.

Ω_{Fi} представляет собой предикат от одного или двух термов – функциональных задач – то есть связь может быть как бинарной, так и унарной. В теории УАРВ присутствует только 4 вида связи:

1. Операция соединения по началу $T_1 \text{CH} T_2$. (7)

2. Операция соединения по концу $T_1 \text{CK} T_2$. (8)

3. Операция следования $T_1 \textcircled{R} T_2$. (9)

4. $(a) \text{P} T_1 + (\neg a) \text{P} T_2$ – Операция навешивания логических переменных на функциональные задачи $(a) \text{P} T_1 + (\neg a) \text{P} T_2$ [1]. (10)

Расширенная теория добавляет к базовому набору следующие операции:

1. Предикат простого предшествования $T_1 < T_2$. (11)

2. Предикат «сильного» предшествования $T_1 \ll T_2$. (12)

3. Предикат наложения (параллельного исполнения) $T_1 \# T_2$. (13)

4. Предикат несовместности по времени $T_1 \langle \rangle T_2$. (14)

5. Предикат несовместности по логике $T_1 \langle l \rangle T_2$ [2]. (15)

Каждая из этих операций может быть преобразована от формул математической логики к математическим соотношениям. Например, $T_1 \# T_2 \equiv t_{T1} = t_{T2}$; $T_1 \# T_2 \equiv t_{T1} + \tau_{T1} = t_{T2} + \tau_{T2}$; $T_1 \# T_2 \equiv t_{T1} + \tau_{T1} = t_{T2}$.

Рассмотрим подробнее предикат несовместности по логике $\langle l \rangle$. Смысл данного предиката состоит в следующем: логический вектор, обуславливающий выполнение T_1 , несовместен с логическим вектором, обуславливающим выполнение T_2 . Понятие логической несовместности обуславливающих векторов означает, что в векторах наличествуют противоречащие друг другу по законам трехзначной логики одноименные компоненты, то есть ИСТИНА и ЛОЖЬ.

Данный предикат является определяющим в модели верификации. Выполнение или невыполнение функциональных задач обуславливается статусом системы (вектором логических переменных \bar{l}) и вектором логических переменных функциональной задачи. Истинность векторов можно установить с помощью функции верификации множества сравниваемых элементов векторов, каждый из которых определяется как $a_{ij} \leftrightarrow b_i$, то есть

$$\Omega_j = \{(\alpha_{ij} \leftrightarrow \beta_i)\}, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}; = \overline{1, M}; \quad (16)$$

где β_i – логическая переменная системы; α_{ij} – i -я логическая переменная j -й функциональной задачи.

Таким образом, результатом функции $f_{av}(\Omega_j)$ будет являться выполнимость функциональной задачи на данном временном базисе. То есть, данный результат показывает, стоит ли учитывать данную функциональную задачу в последующей верификации, выполняется ли она на данном базисе.

После отбрасывания невыполнимых функциональных задач воспользуемся формулами перехода от логических операций между функциональными задачами к математическим соотношениям и последовательно сравним все логические операции, существующие в настоящий момент для выполнимых функциональных задач. Важно заметить, что связи, в которых хотя бы один операнд невыполним, также отбрасываются.

Выборка логических операций может происходить по различным критериям. Возможна группировка по типу, выборка сверху, выборка снизу. При этом сравнение происходит как $O_i \text{ } \text{ } O_j, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, N}, i \neq j$,

где O_i – i -я логическая операция над функциональными задачами.

Для сравнения очередной операции используем функцию верификации множества, элементами которого будут являться математические соотношения обеих связей. Таким образом, если функция верификации множества получит ложь, это скажет о том, что данные операции между функциональными задачами будут являться несовместными на данном временном базисе.

Данная задача, учитывая математические модели, основанные на исчислении предикатов первого порядка, может быть решена либо полностью, с помощью логической машины вывода языка Пролог, либо в паре с автоматизированной системой, написанной на одном из распространенных языков высокого уровня.

2. Проблема верификации требований

2.1 Общая проблема верификации

Для того чтобы продемонстрировать реальную задачу верификации требований, возьмем пример, где заданы функциональные задачи с заданными длительностями исполнения. Но для начала опишем операции, участвующие в данном примере:

$$T_1 \# T_2 \hat{U} t_{T1} = t_{T2}; T_1 \# T_2 \hat{U} t_{T1} + \tau_{T1} = t_{T2} + \tau_{T2}; T_1 \# T_2 \hat{U} t_{T1} + \tau_{T1} = t_{T2}$$

Здесь t_{T1} и t_{T2} – моменты начала выполнения алгоритмов T_1 и T_2 соответственно, τ_{T1} и τ_{T2} – длительности их исполнения.

Пример 1. Пусть имеем следующую формальную спецификацию УА РВ:

$f_1 \text{CH} f_2; f_1 \text{®} f_3; f_4 \text{CK} f_5; f_3 \text{®} f_4; f_2 \text{®} f_5,$
и базис: $(f_1, \tau_1=20); (f_2, \tau_2=100);$
 $(f_3, \tau_3=200); (f_4, \tau_4=10); (f_5, \tau_5=50).$

Приведенная спецификация не будет выполнимой на заданном базисе, в чем можно убедиться, рассмотрев соответствующую циклограмму (рис. 1). Видно, что при заданных значениях длительностей ФЗ не выполняется формула $f_2 \text{®} f_5$.

В то же время, при других значениях длительностей ФЗ, например, нижеследующих:

$(f_1, \tau_1=100); (f_2, \tau_2=150); (f_3, \tau_3=70);$
 $(f_4, \tau_4=30); (f_5, \tau_5=50),$

спецификация становится выполнимой. Визуализацией семантики такого варианта является рис. 2.

Данная ситуация позволяет ставить вопрос о поиске такого базового набора функциональных задач, который бы делал выполнимой заданную спецификацию, что фактически означает решение систем уравнений или неравенств.

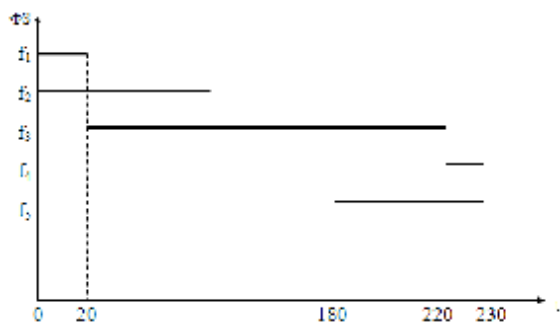


Рис. 1. Циклограмма на базисе, приводящем к невыполнимости

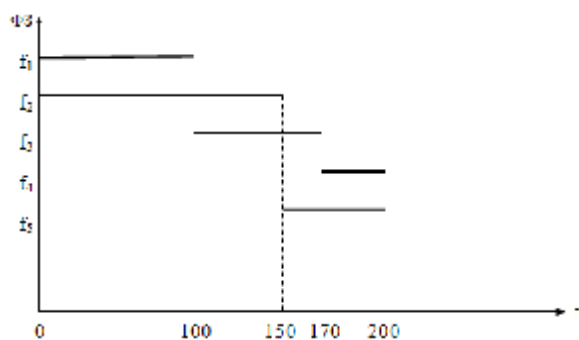


Рис. 2. Циклограмма выполнимой спецификации УА

Таким образом, одна и та же спецификация на языке одной из описанных формальных теорий УА РВ может быть выполнимой (непротиворечивой) на одном базисе функциональных задач и не являться таковой на некотором другом базисе.

2.2 Верификация и энергобаланс

Одним из важнейших факторов при создании управляющих алгоритмов, связанных с управлением физическим объектом, является соблюдение энергобаланса системы. Без учета этого фактора задача верификации станет далекой от реальности: для чего выполнять многочисленные вычисления и принимать решение о правильности исходных требований, если после реализации в аппаратном устройстве для выполнения задачи не хватит мощности?

Поэтому необходим учет электропотребления БА КА при решении функциональных задач, для этого необходим учет электропотребления каждого элемента БА. Состав работающих приборов БА на участке $[t_{i-1}, t_i]$ определяет потребляемую бортовой аппаратурой мощность электрической энергии на участке. Учитывая, что питающее напряжение практически не изменяется, то удобнее пользоваться потребляемым БА током и подсчетом электропотребления в ампер-часах. Потребляемый ток задается в виде графика зависимости $I(t), t \in [t_{i-1}, t_i]$.

Потребление электрической энергии P_i на участке $[t_{i-1}, t_i]$ определится следующим образом:

$$P_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} UI(t)dt = U \int_{t_{i-1}}^{t_i} I(t)dt \text{ (ватт)} \text{ или}$$

$$P_i^* = \int_{t_{i-1}}^{t_i} I(t)dt \text{ (ампер-час)}. \tag{17}$$

Соответственно, суммарное электропотребление БА при реализации режима определяется следующим образом:

$$P = \sum_{i=1}^K P_i.$$

Таким образом, проблема обеспечения энергобаланса в данном случае является одной из проблем верификации исходных требований.

3. Реализация математической модели в автоматизированной системе визуального проектирования

В рамках решения проблемы верификации требований к управляющим алгоритмам реального времени была создана автоматизированная система визуального проектирования, позволяющая размещать на временной диаграмме функциональные задачи, указывать логический вектор системы и устанавливать связи между функциональными задачами.

Данный программный продукт реализует математическую модель верификации требований, описанную выше. Для проверки работоспособности автоматизированной системы возьмем пример, описанный в пункте (2.1), и создадим функциональные задачи заданной длительности (рис. 3).

Определим связи между созданными функциональными задачами, для чего выберем режим создания связей и будем отмечать

функциональные задачи. Все связи будут добавлены в специальное окно системы (рис. 4).

Пока создавали связи, система верификации выполнила свою задачу автоматически и вывела отметки о неверных формулах в специальном окне, представляющем список формул в виде текстовой информации, каждая связь на отдельной строке (рис. 5).

Видим, что конфликтуют связи $f4 \rightarrow f5$ и $f2 \rightarrow f5$. Исходя из этого, возможны несколько вариантов решения: удалить одну из связей или изменить время начала и длительность функциональной задачи $f5$. Выберем второй вариант и поменяем время начала на 130 и длительность на 100 и нажмем кнопку проверки исходной спецификации (рис. 6).

Данная автоматизированная система представляет собой некоторый конструктор, позволяющий уменьшить время на создание логики работы управляющих алгоритмов реального времени.

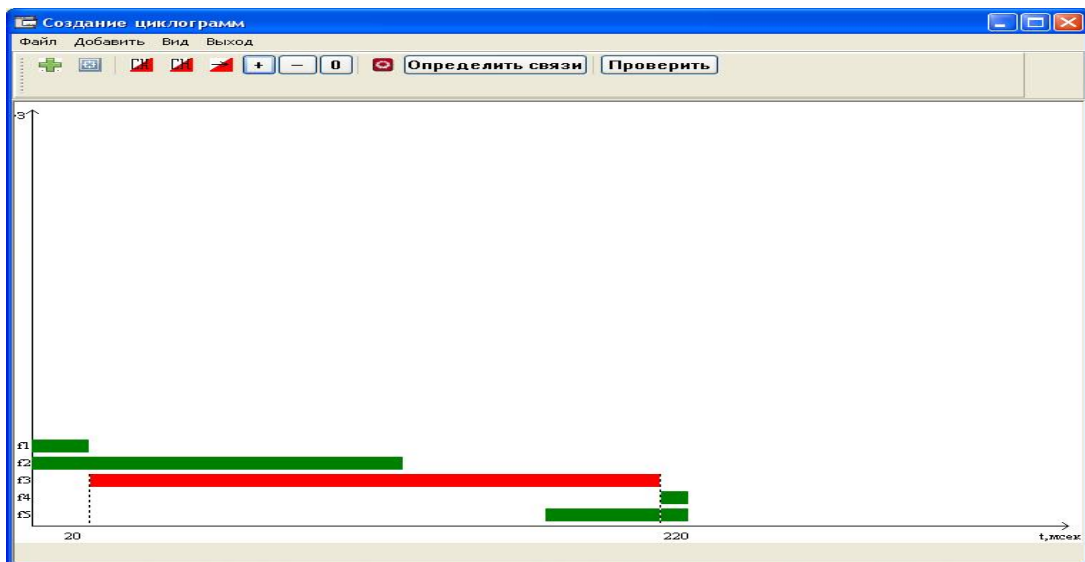


Рис. 3. Циклограмма, созданная в системе визуального проектирования

Номер	Имя задачи 1	Тип связи	Имя задачи 2
0	f1	->	f3
1	f4	СК	f5
2	f3	->	f4
3	f2	->	f5

Рис. 4. Результат создания связей между функциональными задачами

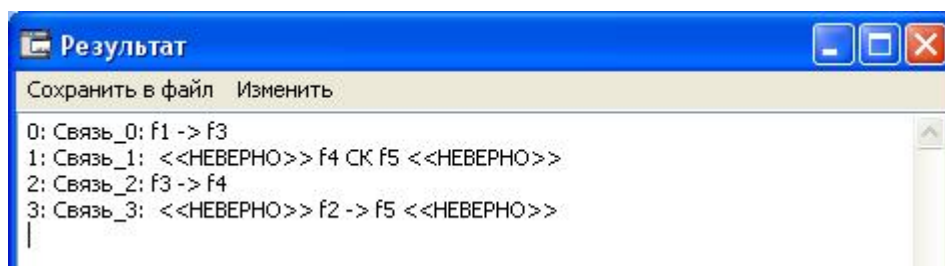


Рис. 5. Результат выполнения верификации в автоматизированной системе визуального проектирования

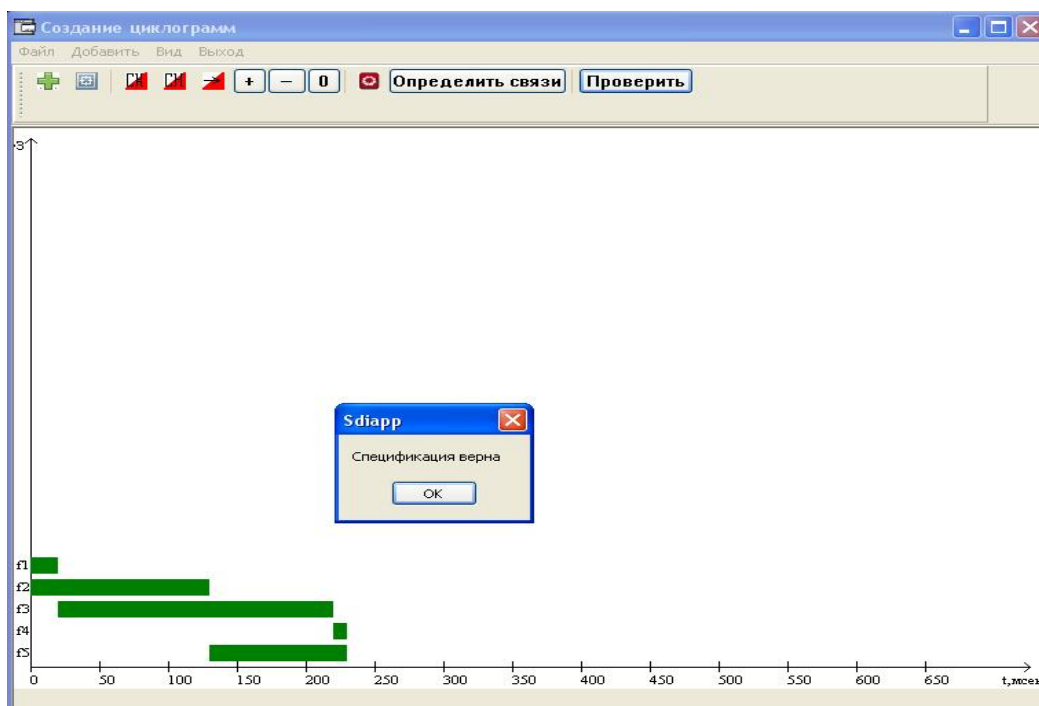


Рис. 6. Результат проверки спецификации

Заключение

Задача автоматической верификации управляющих программ является на данный момент одной из самых актуальных: её решение позволяет уменьшить затраты или совсем избавиться от дорогостоящего тестирования конечного программного продукта. Задача верификации требований стоит особняком из-за того, что именно на этапе спецификации требований определяется поведение разрабатываемой программы и при допущении даже незначительной ошибки программа управления может работать неправильно и разрушить своими действиями дорогостоящие КА. В настоящее время создана автоматизированная система визуального проектирования, реализующая математическую модель верификации. Она позволяет уменьшить временные затраты на создание логики рабо-

ты управляющих алгоритмов реального времени, а также денежные затраты на тестирование полученных результатов. Данный программный продукт находится на этапе тестирования перед внедрением на предприятии «ЦСКБ – Прогресс».

Библиографический список

1. Тюгашев, А. А. Синтез и верификация управляющих алгоритмов реального времени для бортовых вычислительных систем космических аппаратов [Текст] / А. А. Тюгашев. - Диссерт. докт. техн. наук. – Самара: СГАУ, 2007. – 315 с.
2. Тюгашев, А. А. Интегрированная среда для проектирования управляющих алгоритмов реального времени [Текст] / А. А. Тюгашев // Известия РАН. Теория и системы управления. 2006. - № 2. – С. 128-141.

REAL-TIME CONTROL ALGORITHMS REQUIREMENTS VERIFICATION MATHEMATICAL MODEL IMPLEMENTATION IN VISUAL DESIGN COMPUTER-AIDED SYSTEM

© 2012 A. V. Shulyndin, A. A. Tjugashev

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

This document describes problems of the spacecraft's control algorithms correct creating. It contains real-time control algorithms math model, verification math model, it explains requirement's verification problems of the real-time control algorithms and it describes the visual design computer-aided system functioning, that implementing the verification model.

Control algorithm, verification, functional task, mathematical model, energy consumption, prolog, testing.

Информация об авторах

Шулындин Александр Вадимович, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва. E-mail: sasha2410@mail.ru. Область научных интересов: управляющие алгоритмы, математические модели, верификация.

Тюгашев Андрей Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры программных систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: tau7@ssau.ru. Область научных интересов: автоматизация жизненного цикла, методы синтеза, спецификации и проверки управления в реальном времени программного обеспечения.

Shulyndin Alexander Vadimovich, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sasha2410@mail.ru. Area of scientific: control algorithms, mathematical models, verification.

Tyugashev Andrey Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor of the Program Systems Department of the Samara State Aerospace University named by S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: tau7@ssau.ru. Area of scientific: automation of the lifecycle, methods of synthesis, specification and verification of the real-time control software.

ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ПОЗИЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДАТЧИКА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

© 2012 В. С. Тиньгаев¹, С. А. Матюнин², В. А. Медников²

¹ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

²Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В статье рассматривается аппроксимация позиционной характеристики первичных преобразователей с помощью модифицированной функции Гаусса. Приведены сравнительные результаты оптимизации коэффициентов четырёх разновидностей аппроксимирующей функции для трёх критериев оптимизации.

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, особенно 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 и авиационных комплексов возникает необходимость в расширении исследований по созданию первичных преобразователей с высокими стабильными метрологическими показателями, в том числе устойчивыми к особо жестким внешним дестабилизирующим факторам: виброударным воздействиям, глубоким перепадам температур (вплоть до криогенных температур).

Для отработки конструкции преобразователей перемещений и их оптимизации необходима математическая модель, 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 функции:

$$Y1(x) = a + b \cdot (x_0 - x) \cdot e^{-c \cdot (x_0 - x)^2}; \quad (1)$$

$$Y2(x) = a + b \cdot (x_0 - x) \cdot e^{-c \cdot |x_0 - x|}; \quad (2)$$

$$Y3(x) = a + b \cdot (x_0 - x) \cdot e^{-c \cdot |x_0 - x|^z}; \quad (3)$$

$$Y4(x) = a + b \cdot \sin g(x_0 - x) \times$$

$$\times |x_0 - x|^n \cdot e^{-c \cdot |x_0 - x|^z} \quad (4)$$

имеют вид, характерный для позиционных характеристик индуктивных преобразователей перемещения (ИПП).

В качестве критериев оптимизации при поиске неизвестных коэффициентов a , b , c , x_0 , n , z функций (1...4) были выбраны минимальные значения среднеквадратического отклонения W^{CKO} , среднемодульного отклонения W^{CMO} и наибольшего отклонения W^{MMO} во всем диапазоне перемещений X подвижного (элемента) ИПП:

$$Wl(a, b, c, x_0, z, n) = \sqrt{\frac{1}{Nn-1} \times \sum_{j=0}^{Nn-1} (U_j - Yl(a, x_j, b, c, x_0, z, n))^2}; \quad (5)$$

$$W2(a, b, c, x_0, z, n) = \frac{1}{Nn-1} \times \sum_{j=0}^{Nn-1} (|U_j - YI(a, x_j, b, c, x_0, z, n)|); \quad (6)$$

$$W3(a, b, c, x_0, z, n) = \text{Max}(U_j - Y(x_j)), \quad (7)$$

где Nn – количество экспериментальных точек.

Коэффициенты a, b, c, x_0, z, n можно найти минимизируя функцию погрешности W , используя компьютерный математический пакет Mathcad компании MathSoft [2] с помощью функции:

$$\text{Minimize}(W, a, b, c, x_0, z, n). \quad (8)$$

В таблице 1 даны результаты расчетов оптимальных коэффициентов a, b, c, x_0, z, n , обеспечивающих минимальные погрешности аппроксимации функций $Y1(x), Y2(x), Y3(x), Y4(x)$ для каждого критерия $W^{CKO}, W^{CMO}, W^{MMO}$.

На рис. 1 графически представлена аппроксимирующая функция $YI(x)$ оптимизации по среднеквадратическому отклонению W^{CKO} и исходный набор данных $U_j(x_j)$.

Относительные погрешности среднеквадратического отклонения $\gamma1_{CKO}$, среднемодульного отклонения $\gamma1_{CMO}$ и наибольшего отклонения $\gamma1_{MMO}$ для всего диапазона аппроксимации для функции $YI(x)$ (формула 1), оптимизированных на минимум среднеквадратического отклонения, определяются как:

$$\gamma1_{CKO} = \frac{100}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} \times \times W1_{CKO}^{CKO}(a, b, c, x_0) = 2,01; \quad (9)$$

$$\gamma1_{CMO} = \frac{100}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} \times \times W1_{CMO}^{CKO}(a, b, c, x_0) = 1,32; \quad (10)$$

$$\gamma1_{MMO} = \frac{100}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} \times \times W1_{MMO}^{CKO}(a, b, c, x_0) = 5,2. \quad (11)$$

Относительные погрешности среднеквадратического отклонения $\gamma1_{CKO}$, среднемодульного отклонения $\gamma1_{CMO}$ и наибольшего отклонения $\gamma1_{MMO}$ для всего диапазона аппроксимации для функции $YI(x)$ (формула 1), оптимизированных на минимум среднемодульного отклонения определяются как:

$$g1_{CKO}^{CMO} = \frac{100}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} \times ; \quad (12)$$

$$\times W1_{CKO}^{CMO}(a, b, c, x_0) = 2,1$$

$$g1_{CMO}^{CMO} = \frac{100}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} \times ; \quad (13)$$

$$\times W1_{CMO}^{CMO}(a, b, c, x_0) = 1,24$$

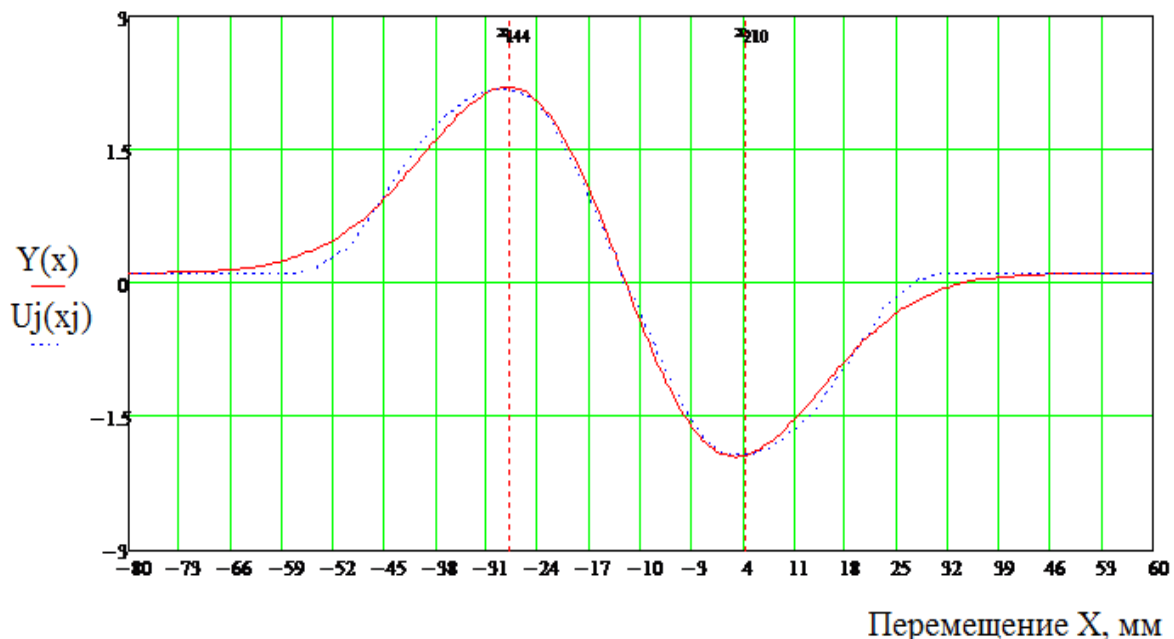


Рис. 1. Позиционные характеристики экспериментальной U_j и аппроксимирующей функции $YI(x)$

$$g1_{\text{MMO}}^{\text{CMO}} = \frac{100}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} \times \times W1_{\text{MMO}}^{\text{CMO}}(a, b, c, x_0) = 6,14 \quad (14)$$

Относительные погрешности средне-квadraticеского отклонения $\gamma1_{\text{CKO}}$, средне-модульное отклонения $\gamma1_{\text{CMO}}$ и наибольшего отклонения $\gamma1_{\text{MMO}}$ для всего диапазона аппроксимации для функции $Y1(x)$ (формула 1), оптимизированных на минимум максимального отклонения, определяются как:

$$g1_{\text{CKO}}^{\text{MMO}} = \frac{100}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} \times \times W1_{\text{CKO}}^{\text{MMO}}(a, b, c, x_0) = 2,16 \quad (15)$$

$$g1_{\text{CMO}}^{\text{MMO}} = \frac{100}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} \times \times W1_{\text{CMO}}^{\text{MMO}}(a, b, c, x_0) = 1,38 \quad (16)$$

$$g1_{\text{MMO}}^{\text{MMO}} = \frac{100}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} \times \times W1_{\text{MMO}}^{\text{MMO}}(a, b, c, x_0) = 5,01 \quad (17)$$

Аналогично была проведена оптимизация функций $Y2(x)$, $Y3(x)$, $Y4(x)$, результаты которой помещены в таблицу 1.

Распределение погрешности ϵ_j аппроксимации функцией $Y1(x)$ в каждой j -й экспериментальной точке вычислялось по формуле:

$$e_j = \frac{U_j - Y1(x_j, a, b, c, x_0)}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} \cdot 100\% \quad (18)$$

и представлено графически на рис. 2: $\epsilon1_j$ – при минимизации среднеквadraticеского отклонения; $\epsilon2_j$ – при минимизации средне-модульного отклонения; $\epsilon3_j$ – при минимизации максимального отклонения.

Распределение погрешности ϵ_j аппроксимации функцией $Y2(x)$ в каждой j -й экспериментальной точке вычислялось по формуле:

$$e_j = \frac{U_j - Y2(x_j, a, b, c, x_0)}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} \cdot 100\% \quad (19)$$

и представлено графически на рис. 3: $\epsilon1_j$ – при минимизации среднеквadraticеского отклонения

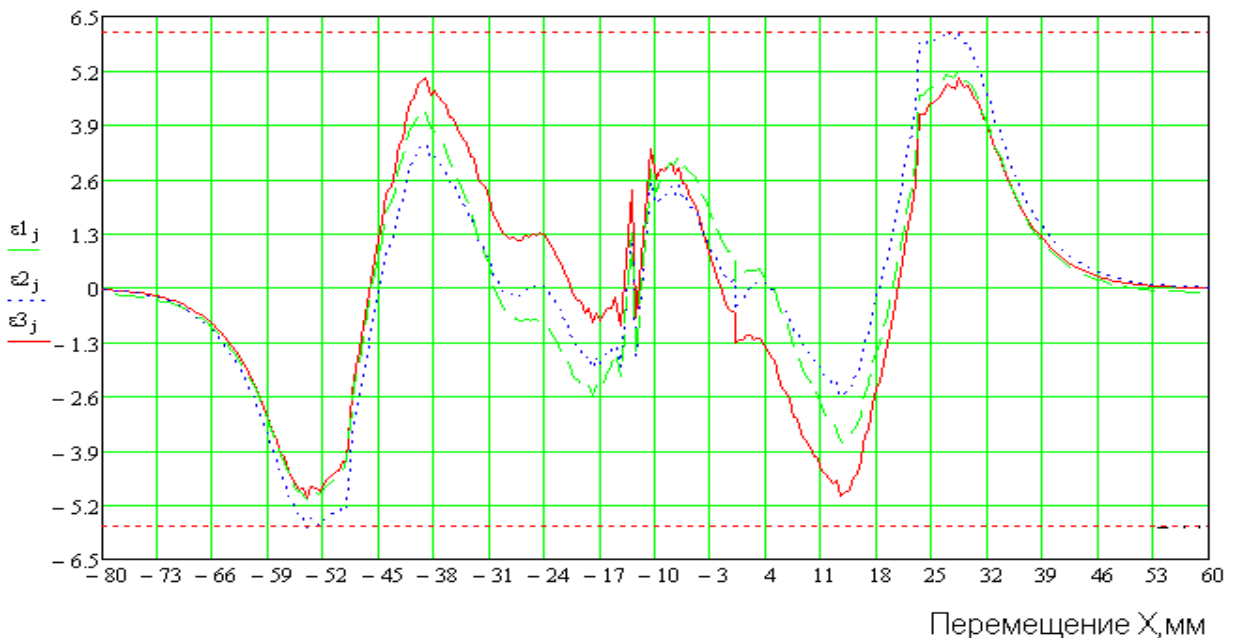


Рис. 2. Относительная погрешность аппроксимирующей функции $Y1(x)$: $\epsilon1_j$ – при минимизации среднеквadraticеского отклонения; $\epsilon2_j$ – при минимизации средне-модульного отклонения; $\epsilon3_j$ – при минимизации максимального отклонения

ния; ϵ_{2j} – при минимизации среднемодульного отклонения; ϵ_{3j} – при минимизации максимального отклонения.

На рис. 2, 3 показаны относительные погрешности аппроксимирующих функций $Y1(x)$, $Y2(x)$, из которых видно, что по краям экспериментальной характеристики погрешность аппроксимации максимальная, а в центральной области погрешность аппроксимации минимальна.

Распределение погрешности ϵ_j аппроксимации функцией $Y3(x)$ в каждой j -й экспериментальной точке вычислялось по формуле:

$$e_j = \frac{U_j - Y3(x_j, a, b, c, x_0)}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot 100\% \quad (20)$$

и представлено графически на рис.4: ϵ_{1j} – при минимизации среднеквадратичного отклонения; ϵ_{2j} – при минимизации среднемодульного отклонения; ϵ_{3j} – при минимизации максимального отклонения.

Распределение погрешности ϵ_j аппроксимации функцией $Y4(x)$ в каждой j -й экспериментальной точке вычислялось по формуле:

$$e_j = \frac{U_j - Y4(x_j, a, b, c, x_0)}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot 100\% \quad (21)$$

и представлено графически на рис.5: ϵ_{1j} – при минимизации среднеквадратичного отклонения; ϵ_{2j} – при минимизации среднемодульного отклонения; ϵ_{3j} – при минимизации максимального отклонения.

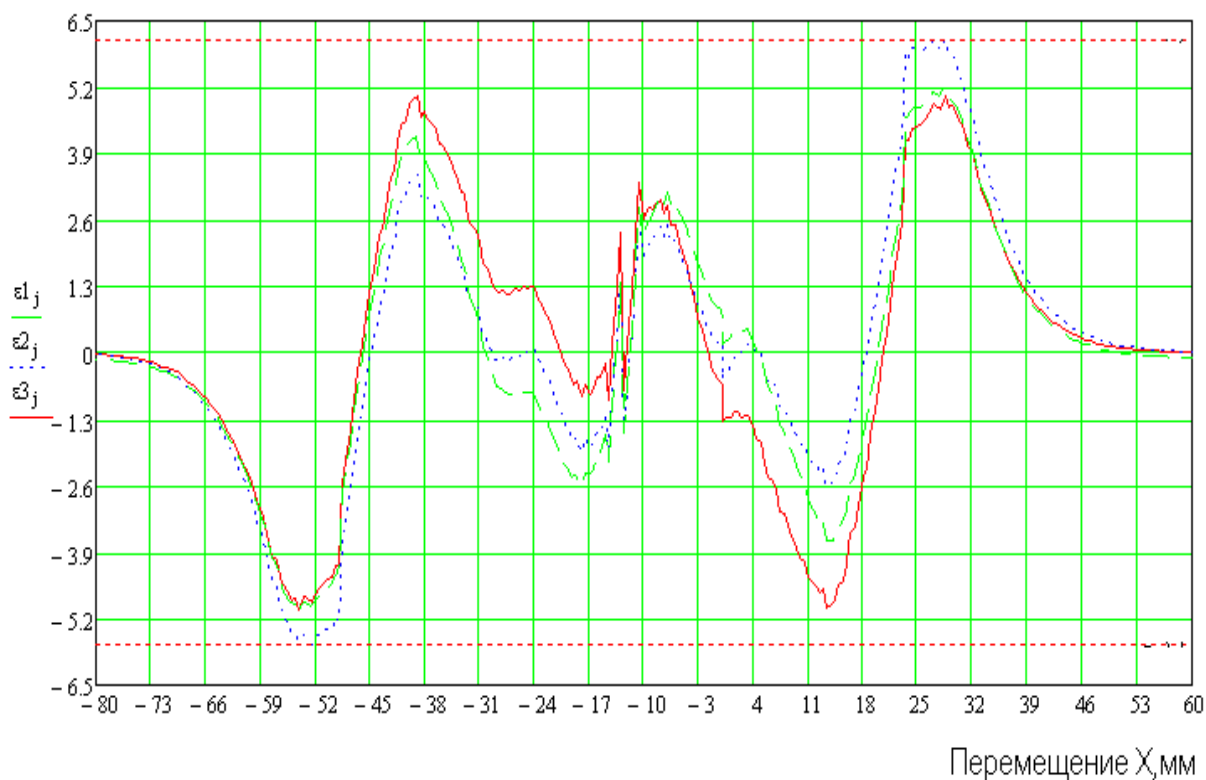


Рис. 3. Обобщенная погрешность аппроксимирующей функции $Y2(x)$

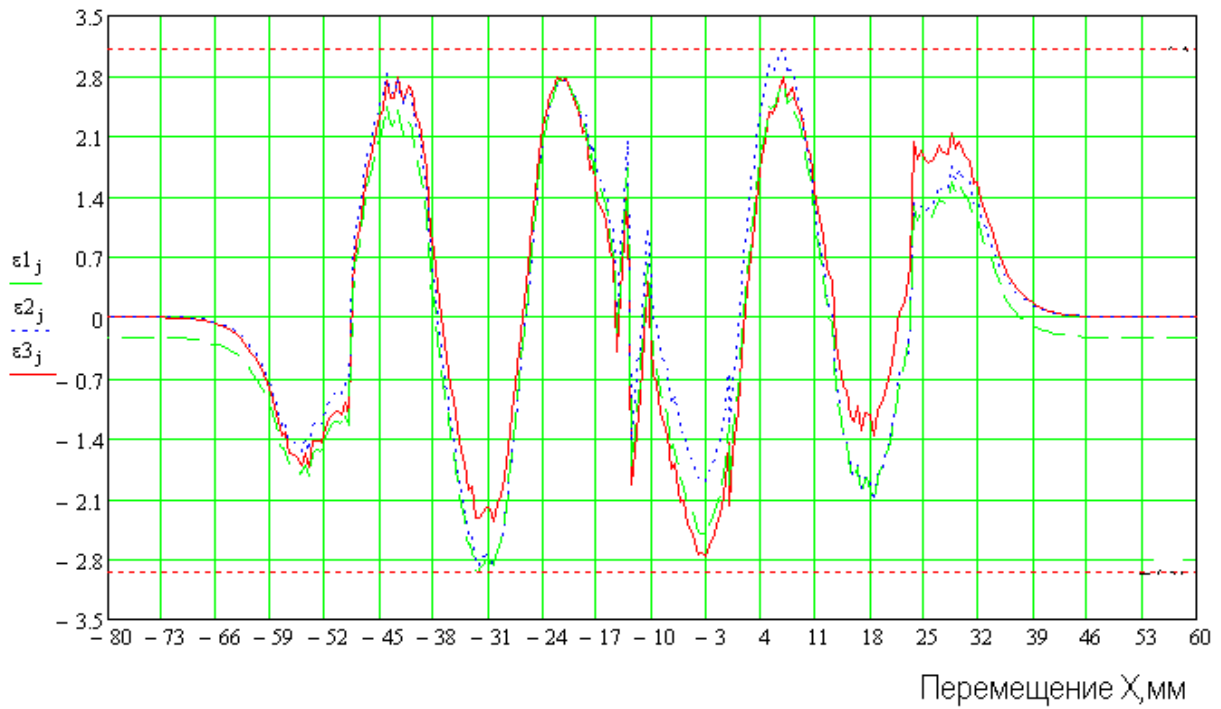


Рис. 4. Обобщенная погрешность аппроксимирующей функции $Y3(x)$

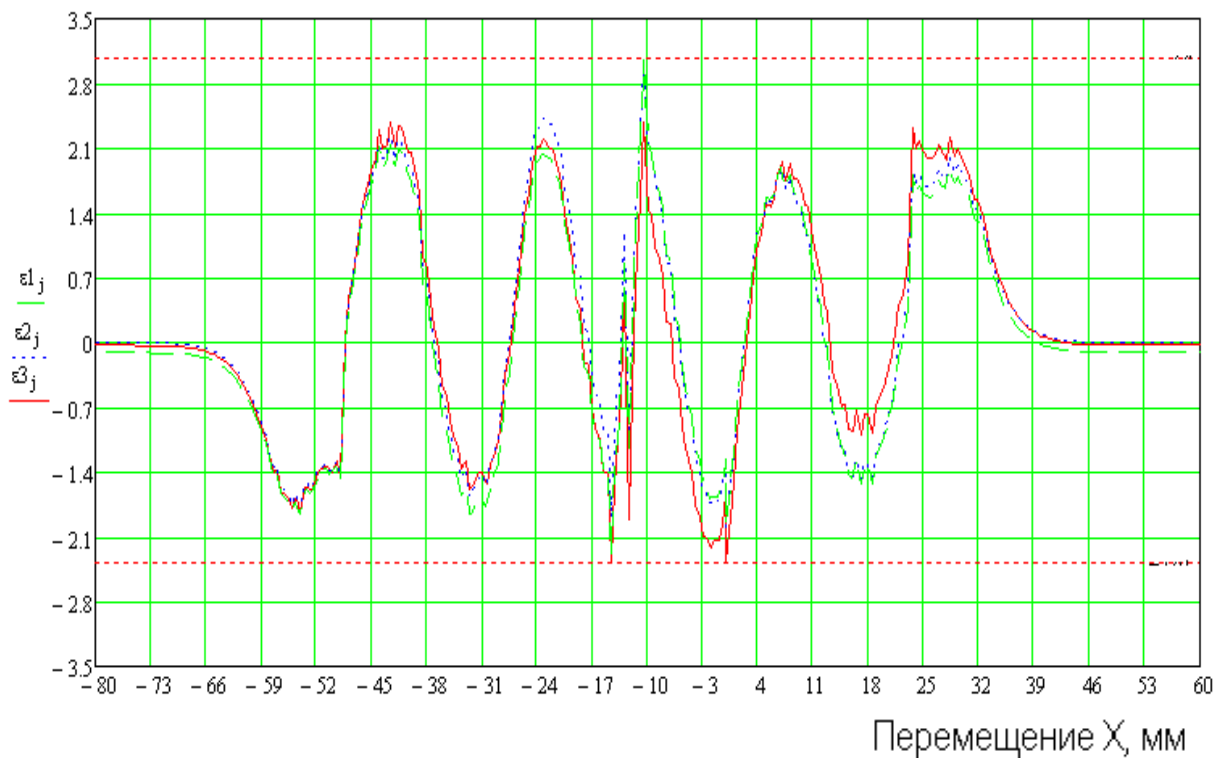


Рис. 5. Обобщенная погрешность аппроксимирующей функции $Y4(x)$

На рис. 4, 5 показаны относительные погрешности аппроксимирующих функций $Y3(x)$, $Y4(x)$, из которых видно, что по краям экспериментальной характеристики погреш-

ность аппроксимации и в центральной области погрешность аппроксимации минимальные.

Таблица 1. Оптимизация и оценка погрешности $W1$, $W2$, $W3$ аппроксимирующими функциями $Y1(x)$, $Y2(x)$, $Y3(x)$, $Y4(x)$

	Относительная погрешность для функций $Y1(x)$, $Y2(x)$, $Y3(x)$, $Y4(x)$											
	Среднеквадратическая, %.				Среднемодульная, %.				Максимальная, %.			
Средне квадратического отклонения (СКО)	$Y1(x)$ 2,01	$Y2(x)$ 2,01	$Y1(x)$ 1,32	$Y2(x)$ 1,32	$Y1(x)$ 5,2	$Y2(x)$ 5,2						
	$Y3(x)$ 1,19	$Y4(x)$ 0,96	$Y3(x)$ 0,87	$Y4(x)$ 0,66	$Y3(x)$ 2,94	$Y4(x)$ 3,07						
Средне модульного отклонения (СМО)	$Y1(x)$ 2,09	$Y2(x)$ 2,09	$Y1(x)$ 1,24	$Y2(x)$ 1,24	$Y1(x)$ 6,14	$Y2(x)$ 6,14						
	$Y3(x)$ 1,19	$Y4(x)$ 0,97	$Y3(x)$ 0,75	$Y4(x)$ 0,62	$Y3(x)$ 3,12	$Y4(x)$ 3,08						
Минимизация максимального отклонения, (ММО)	$Y1(x)$ 2,16	$Y2(x)$ 2,16	$Y1(x)$ 1,38	$Y2(x)$ 1,39	$Y1(x)$ 5,0	$Y2(x)$ 5,02						
	$Y3(x)$ 1,19	$Y4(x)$ 0,99	$Y3(x)$ 0,76	$Y4(x)$ 0,63	$Y3(x)$ 2,78	$Y4(x)$ 2,38						
	Коэффициенты аппроксимирующих функций											
Оптимизация погрешности	a		b		c		x_0		z		n	
Средне квадратического отклонения (СКО)	0,12	0,12	0,21	0,22	$2,03 \times 10^{-3}$	$2,04 \times 10^{-3}$	-12,59	-12,59	---	---	-	---
	0,13	0,12	0,17	0,24	$1,04 \times 10^{-4}$	$5,36 \times 10^{-5}$	-12,61	-12,61	2,8	2,9	-	0,85
Среднемодульного отклонения (СМО)	0,12	0,12	0,21	0,21	$1,96 \times 10^{-3}$	$1,96 \times 10^{-3}$	-12,56	-12,56	---	---	-	---
	0,12	0,12	0,17	0,24	$1,08 \times 10^{-4}$	$5,66 \times 10^{-5}$	-12,62	-12,63	2,8	2,9	-	0,86
Минимизация максимального отклонения, (ММО)	0,12	0,12	0,21	0,21	$2,03 \times 10^{-3}$	$2,04 \times 10^{-3}$	-12,75	-12,74	---	---	-	---
	0,12	0,12	0,17	0,23	$1,15 \times 10^{-4}$	$5,91 \times 10^{-5}$	-12,5	-12,5	2,8	2,9	-	0,87

По данным таблицы 1 построены графики среднеквадратического отклонения, среднемодульного отклонения, и максимального отклонения для функций $Y1(x)$, $Y2(x)$, $Y3(x)$, $Y4(x)$, оптимизированных по минимуму

среднеквадратического отклонения (рис. 6,а), по минимуму среднемодульного отклонения (рис. 6,б), по минимуму максимального отклонения (рис. 6,в).

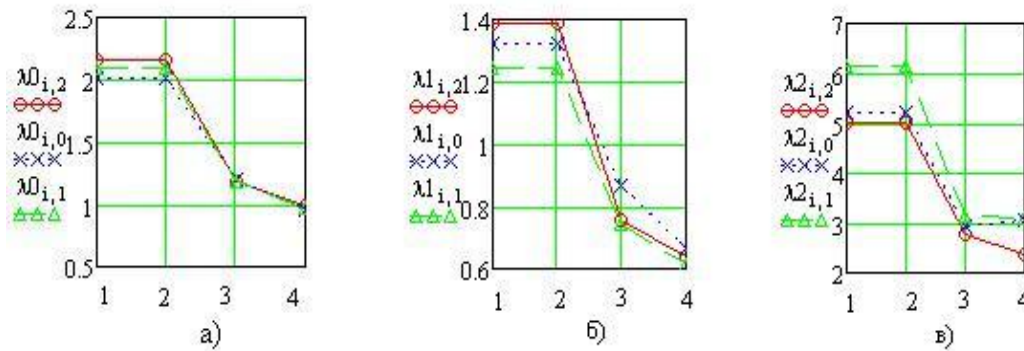


Рис. 6. Оптимизация по минимуму:

а) среднеквадратического отклонения б) среднемодульного отклонения в) максимального отклонения

Оптимизация по максимальному и среднемодульному отклонению требует меньше затрат машинного времени, а результат оптимизации практически не зависит от способа оптимизации по формулам (3), (4). Формулы (1), (2) дают практически одинаковые результаты.

Формула (3) позволяет существенно уменьшить погрешность (в 2 раза), а формула (4) позволяет уменьшить погрешность на 19,5% по сравнению с формулой (3).

Вывод по рис.6, а: для достижения минимальной погрешности рекомендуется использовать формулу (4). При ограниченном быстродействии рекомендуется использовать формулу (3). Для моделей, не требующих высокой точности, можно ограничиться формулами (1), (2).

Оптимизация по максимальному и среднеквадратическому отклонению требует меньше затрат машинного времени, а результат оптимизации практически не зависит от способа оптимизации по формулам (3), (4). Формулы (1), (2) дают практически одинаковые результаты.

Формула (3) позволяет существенно уменьшить погрешность (в 2 раза), а формула (4) позволяет уменьшить погрешность на 17% по сравнению с формулой (3).

Вывод по рис.6, б: для достижения минимальной погрешности рекомендуется использовать формулу (4). При ограниченном быстродействии рекомендуется использовать формулу (3). Для моделей, не требующих высокой точности, можно ограничиться форму-

лами (1), (2).

Оптимизация по среднеквадратическому и среднемодульному отклонению требуют меньше затрат машинного времени, а результат оптимизации практически не зависит от способа оптимизации по формулам (3), (4). Формулы (1), (2) дают практически одинаковые результаты.

Формула (3) позволяет существенно уменьшить погрешность (в 2 раза), а формула (4) позволяет уменьшить погрешность на 14,5% по сравнению с формулой (3).

Вывод по рис. 6, в: для достижения минимальной погрешности рекомендуется использовать формулу (4). При ограниченном быстродействии рекомендуется использовать формулу (3). Для моделей, не требующих высокой точности можно ограничиться формулами (1), (2).

Библиографический список

1. Тиньгаев, В.С. Аппроксимация характеристик индуктивных датчиков линейных перемещений с помощью модифицированной функции Гаусса с разностным аргументом первого порядка [Текст] / В.С. Тиньгаев, С.А. Матюнин, В.А. Медников // Вестник Самарского государственного Аэрокосмического университета, - 2011. – Вып. №7 (31). – С. 77 – 81.
2. Кирьянов, Д.В. Самоучитель Mathcad 11. - СПб.: БХВ-Петербург, 2003. - 560 с.
3. Карпов, В. И. Проектирование датчиков для измерения механических величин. – М.: Машиностроение, 1979. – 207 с.

4. Аш, Ж. Датчики измерительных систем. Кн. 1. – М.: Мир, 1992. – 480 с.
5. Дж. Фрайден. Современные датчики. Справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
6. Baumer (Швейцария) Индуктивные датчики с пропорциональным (аналоговым) выходом [http:// www.promsystex.ru/catalog](http://www.promsystex.ru/catalog)
7. Baumer (Швейцария) Магнитные датчики, датчики линейных перемещений [http:// www.promsystex.ru/catalog](http://www.promsystex.ru/catalog)

OPTIMIZATION OF MODEL POSITIONAL CHARACTERISTICS OF THE ELECTROMAGNETIC SENSOR OF THE LINEAR PEREMESHCHNY

© 2012 V. S. Tingaev¹, S. A. Matyunin², V. A. Mednikov²

¹FSUE SRPSRC “TsSKB-Progress”

²Samara State Aerospace University named after academician 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, начальник сектора, 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, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: mitrea.sgau@rambler.ru. Область научных интересов: информационно измерительные системы и приборы, элементы и устройства вычислительной техники систем управления.

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

Tingaev Vladimir Sergeevich, leader of sector, FSUE SRPSRC “TsSKB-Progress”. E-mail: tingaev@inbox.ru. Area of scientific: information and measurement systems and devices, electromagnetic elements of control systems computers.

Matyunin Sergey Alexandrovitch, doctor of technical sciences, professor, head of a chair of electronic systems and devices. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: mitrea.sgau@rambler.ru. Area of scientific: information and measurement systems and devices, electromagnetic elements of control systems computers.

Mednikov Valeriy Alexandrovitch, candidate of technical sciences, associate professor at a chair of electronic systems and devices. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: wamednikov@gmail.com. Area of scientific: information and measurement systems and devices, electromagnetic elements of control systems computers.

УДК 621.382.049.77+629.78

МЕТОДИКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ

© 2012 А. В. Наседкин, С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов

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

Предложен алгоритм проведения производственных испытаний электронных узлов. Рассмотрены особенности динамических испытаний. Выбраны испытательные воздействия. Определено время проведения испытаний для линейной модели изменения параметров электрорадиоизделий.

Производственные испытания, алгоритм, испытательные воздействия, линейная модель, время испытаний.

Введение

Одной из тенденций современного рынка электроники является повышение требований к надежности изделий. Отказы изделий космической промышленности приводят к большим финансовым потерям ввиду невозможности или дороговизны выявления и ремонта отказа, произошедшего на объекте, находящемся в космосе. К тому же, в некоторых случаях потери могут исчисляться не только деньгами, но и человеческими жизнями.

Одной из основных проблем надёжности радиоэлектронного изделия российских производителей космической и военной промышленности, возникшей после появления директивы об отходах радиоэлектронного и электрооборудования (WEEE-Waste Electrical and Electronic Equipment) и директивы о сокращении опасных веществ в радиоэлектронном и электрооборудовании (RoHS-Restriction of Hazardous Substances), одобренных Европейским Сообществом в начале этого века, является надёжность паяного соединения выводов электрорадиоизделия (ЭРИ) с бессвинцовым покрытием с использованием свинецсодержащего припоя. В настоящее время отечественная радиоэлектронная промышленность только частично обеспечивает разработчиков радиоэлектронной аппаратуры необходимыми изделиями электронной техники, а значит, им приходится прибегать к использованию импортных компонентов, которые в

большинстве случаев выпускаются в общепромышленном исполнении (“industry”) и не содержат в составе финишного покрытия свинец. В настоящее время в литературе очень мало внимания уделяется вопросам качества и надёжности комбинированных или смешанных паяных соединений, когда сочетаются бессвинцовые и свинцовые материалы. При этом, как правило, рассматривается задача пайки компонента с покрытием выводов, содержащим свинец, бессвинцовым припоем, а не наоборот.

Все эти факторы заставляют задуматься о проведении испытаний на надёжность изделий, в которых использовалась комбинированная пайка, для создания выводов о приемлемости применения их в составе аппаратуры космического и военного назначения. Однако условия, выдвигаемые заказчиками, предполагают длительный срок активного существования изделия, при котором обычные методы испытаний становятся неприемлемыми из-за большого времени их реализации. Ввиду этих ограничений на первый план выходят методы ускоренных испытаний, которые позволяют значительно сократить время исследования, а также уменьшить его стоимость.

Динамические испытания

Динамические испытания – испытания изделий воздействием динамических факторов различной физической природы, например, удар, вибрация, линейное

ускорение, тепловое воздействие, тестовая диагностика. Они представляют собой многоплановую, трудоёмкую и дорогостоящую процедуру, требующую для своего осуществления сложного оборудования, оснастки, аппаратурного и методического обеспечения, квалифицированного персонала. Динамические испытания, в зависимости от целевой установки и особенностей конкретного изделия, могут быть высокоинтенсивными и диагностическими. Высокоинтенсивные испытания применяются, например, для определения ударной и вибрационной устойчивости или прочности изделий, а диагностические – для выявления дефектов изготовления или полученных в ходе эксплуатации изделия [1].

К высокоинтенсивным динамическим испытаниям сложных изделий можно отнести ударные испытания на аварийные воздействия [2], а также вибрационные испытания устройств с высокочастотными резонансными характеристиками составных частей [3]. Можно отметить две важные особенности таких испытаний [1]:

1) уникальность, однократность, невоспроизводимость;

2) необходимость применения высоконадёжной, высококачественной аппаратуры и соответствующего методического обеспечения.

В данной работе предложен алгоритм ускоренных производственных испытаний паяных соединений электронных узлов (рис. 1).

Выбор испытательных воздействий

1. Общие положения

Целью ускоренных испытаний является достижение состояния отказа или накопления повреждений вследствие действия определённого механизма разрушения, но за время меньшее, чем потребовалось бы при эксплуатации изделия. Для достижения этого существует несколько общих способов:

- Интенсивность параметров, от которых зависит долговечность, может быть повышена для сокращения долговечности.

- Величина параметров, влияющих на долговечность, может поддерживаться на расчётном уровне, но воздействие выполняется с повышенной частотой, что приводит к сокращению продолжительности испытаний.

- Имеется также возможность применения этих двух подходов комбинированно.

Особую важность имеет установление соотношения между ускоренным испытанием и реальными условиями эксплуатации, которые подвергаются ускорению, без этого любые выводы могут быть в корне неверными.

Хотя использование ускоренных испытаний может быть опасным, поскольку они вносят факторы неопределённости, избежать их в общем случае нельзя, потому что требуемый срок активного существования слишком велик для проведения испытаний в более реалистичных условиях.

Для выделения различных процессов разрушения существуют различные типы испытаний. Для ускорения механизмов разрушения, от которых зависит долговечность паяного соединения, необходимо выполнить испытания на тепловую усталость, тепловой удар и вибрационные испытания. Выбор типа и условий испытаний должен осуществляться на основании соответствующих механизмов отказа или повреждения и условий эксплуатации.

2. Термоциклирование

При термоциклировании тест-платы подвергаются поочередному воздействию высоких и низких температур с определёнными временами выдержки. Во избежание теплового удара скорость изменения температуры не должна превышать 20°C/мин. Для создания повреждений от процессов усталости/ползучести, с учётом космической области применения, необходим диапазон температур от -30°C до +80°C с выдержками порядка 15 минут при определённых значениях температур.

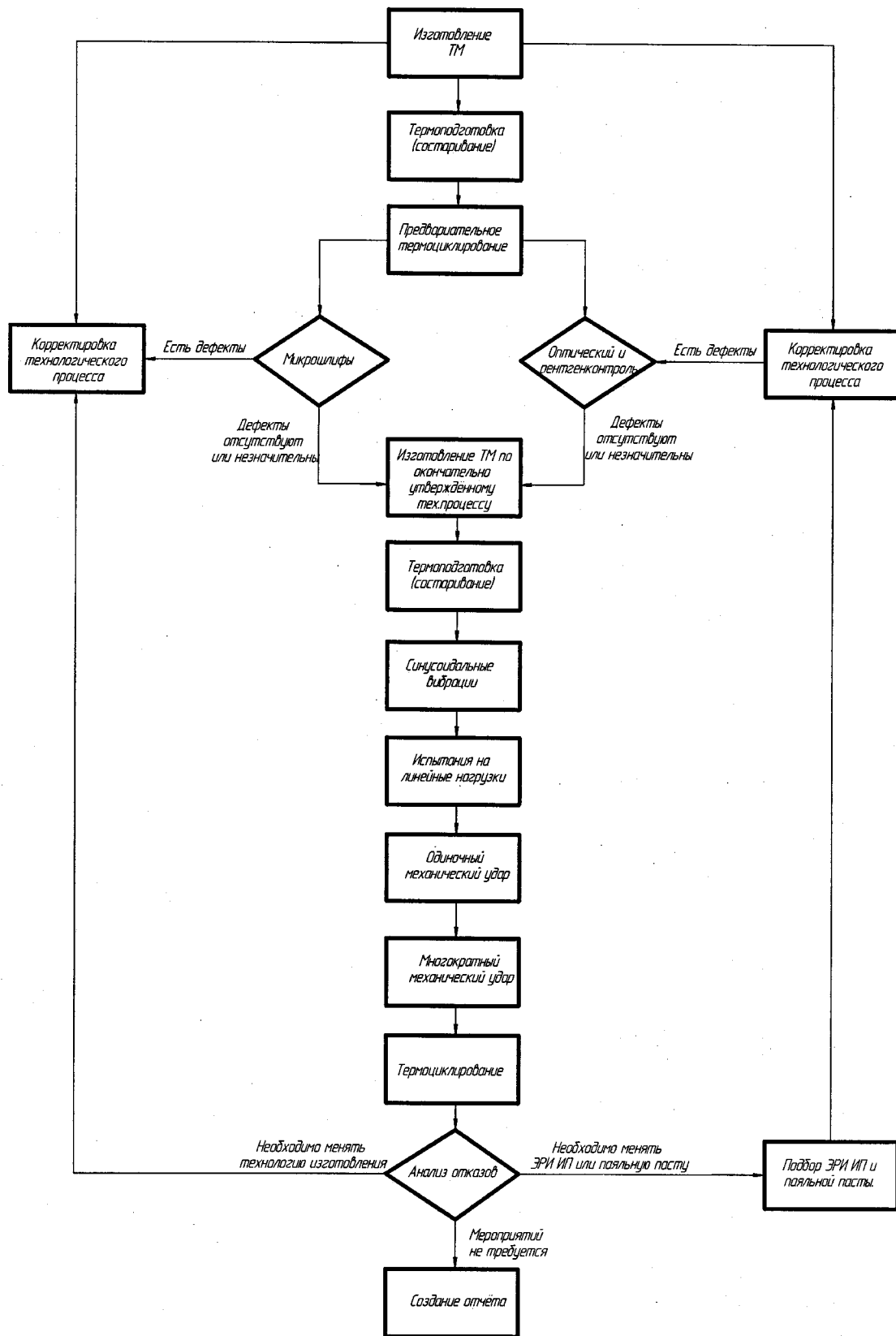


Рис. 1. Алгоритм ускоренных производственных испытаний

3. Вибрация

3.1. Условия воздействия случайной вибрации

По результатам исследований, спектральный состав вибраций, воздействию которых подвергается электронная аппаратура, распределён в широком диапазоне частот. Это означает, что вибрации любой частоты присутствуют одновременно в различных сочетаниях интенсивности. Эксперименты, проводимые в управляемых условиях, показали, что широкополосное воздействие при испытаниях можно успешно моделировать, применяя непериодическую (случайную) вибрацию.

Спектры непериодической вибрации определяются как профили спектральной плотности ускорения (называемой также спектральной плотностью энергии), которые связывают уровни плотности энергии с определёнными полосами частот. Вибрация определяется относительно соответствующего частотного диапазона.

Использование среднеквадратических значений ускорения для описания вибрационных испытаний некорректно, поскольку среднеквадратическое значение ускорения не характеризует конкретный профиль вибрации. Одним среднеквадратическим значением ускорения можно описать бесконечное количество вариаций частотных полос и спектральных форм. Поэтому, при измерении величины и спектрального состава вибраций или при испытаниях энерго-содержание будет соотноситься с определённой полосой частот.

3.2. Условия воздействия синусоидальной вибрации

Испытание проводят путем плавного изменения частоты в заданном диапазоне от низшей к высшей и обратно. Испытания изделий с линейными резонансными характеристиками проводят путем изменения частоты в одном направлении. Значение скорости изменения частоты устанавливают равным

одной-двум октавам в минуту. Если для контроля параметров изделий требуется большее время, чем обеспечиваемое при данной скорости изменения частоты, то допускается устанавливать скорость изменения частоты менее одной октавы в минуту.

При этом скорость изменения частоты должна быть максимальной, но достаточной для обеспечения контроля необходимых параметров.

Значение скорости изменения частоты в диапазоне частот 1...50 Гц допускается устанавливать равным 10 Гц/мин. В диапазоне частот ниже частоты перехода поддерживают постоянную амплитуду перемещения, а выше частоты перехода – постоянную амплитуду ускорения.

3.3. Влияние механического импеданса

Необходимо сделать поправку, учитывающую влияние механического импеданса, поскольку преимущества от приближения условий испытаний к реальным компенсируют затраты времени, усилий и денежных средств.

Реакция конструкции оборудования скрывает собственное динамическое влияние на функцию внешнего воздействия. На резонансных частотах конструкции, когда ответные воздействия возрастают, она нагружает прилегающие опорные элементы (то есть создает провалы характеристики спектральной плотности ускорения на этих частотах). Величина влияния нагрузки определяется относительным импедансом конструкции оборудования и опорных элементов. Как известно из практики, резонирующий элемент создаёт нагружающую силу, пропорциональную его динамической массе, умноженной на соответствующий коэффициент усиления.

Влияние механического импеданса может давать свой вклад в образование спектра вибрационных испытаний. Глубина провалов определяется по результатам измерений или расчётным путём.

3.4. Ускорение воздействия вибраций

Выполнять вибрационные испытания необходимо только при наличии надёжного крепления или на замкнутых системах, чтобы учесть точные характеристики резонансных частот и условия эксплуатации.

Существует три различных типа вибрационных испытаний, каждое из которых имеет самостоятельную цель:

- Функциональные вибрационные испытания. Они предназначены для проверки работоспособности оборудования при максимальном ожидаемом уровне вибрации. Продолжительность функциональных испытаний выбирается достаточно лишь для того, чтобы удостовериться в работоспособности оборудования.

- Испытания на стойкость. Они проводятся с целью продемонстрировать, что оборудование обладает конструктивной и функциональной долговечностью, сравнимой с ТУ. Уровни и продолжительность испытаний на стойкость устанавливаются путём подъёма функциональных уровней и увеличением длительности испытания до возникновения усталостных повреждений, эквивалентных приобретаемым в течение срока службы. Это приводит к тому, что уровни вибрационных испытаний превышают максимально ожидаемые при эксплуатации, в некоторых случаях они намного выше. В испытаниях на стойкость необязательно устанавливается усталостная долговечность, поскольку они не продолжаются до разрушения оборудования. Испытания на стойкость проводятся только в течение заданного периода времени. Статистическая величина выборки достаточно мала, чтобы адекватно судить об усталостной долговечности.

- Ускоренные испытания на долговечность. В этом случае применяются повышенные функциональные уровни, как и в испытаниях на стойкость, но испытания длятся до отказа

оборудования. При этом должно использоваться несколько тестовых плат, чтобы обеспечить статистическую достоверность ускоренной усталостной долговечности.

Для масштабирования уровней вибрации, продолжительности испытаний и вывода преобразований ускорения при нагружении случайной вибрацией часто используется упрощенное соотношение для усталости. В уравнении сравниваются два режима испытаний, 1 и 2:

$$\left(\frac{СПЭ_1}{СПЭ_2} \right)^M = \frac{t_2}{t_1}, \quad (1)$$

где СПЭ – спектральная плотность энергии ($G^2/Гц$); t – время (с); M – константа материала.

Оно представляет линейную биполярную зависимость СПЭ от времени, отрицательный наклон которой равен $1/M$, если откладывать время на горизонтальной оси. Уравнение (1) может быть представлено в виде соотношения Баскина для многоциклового усталости или в виде общепризнанной кривой S/N, линейной двойной логарифмической зависимостью между напряжением и количеством циклов до наступления отказа. Значение M для паяных соединений находится в пределах от 3 до 4.

Небольшое отклонение значения показателя M может вызвать существенное изменение прогнозируемой долговечности печатного узла, если уравнение используется для пересчета при переходе от одного режима к другому. Вероятность возникновения ошибки экстраполяции особенно возрастает, если долговечность по двум режимам отличается более чем в десять раз, поэтому при проведении испытания необходимо выбрать продолжительность с учётом целесообразности работы на низких уровнях вибрации.

3.5. Испытания на механический удар

Испытания на механический удар представляют собой интенсивное

ускорение, которое имитирует жесткие условия эксплуатации. К этим условиям относятся мгновенно приложенные нагрузки или резкие изменения характера движения (например, при старте ракетносителя). Удары этой категории могут нарушить эксплуатационные характеристики или вызвать повреждение, аналогичное тому, которое возникает при чрезмерной вибрации.

Для испытаний на механический удар применяются очень быстрые и резкие циклы нагружения. Обычно ударные импульсы имеют порядок от 500g до 30000g с длительностью импульса от 0,1 до 1,0 миллисекунд. Высокая частота следования циклов позволяет проводить испытания с применением очень малых нагрузок или диапазонов смещения.

Механический удар характеризуется максимальной амплитудой, продолжительностью и ускорением, и обычно применяется к системе в виде толчка, импульса или шага. Реакция системы на удар зависит от природы удара, компоновки и материалов системы, ориентации системы относительно направления удара и резонансной частоты (или частот) системы. При небольшой длительности толчка или такта система может вибрировать на собственной резонансной частоте; амплитуда этих свободных колебаний со временем уменьшается в зависимости от демпфирующих свойств системы для диссипации механической энергии подобно тепловой.

Испытания на механический удар призваны дать количественную оценку надёжности изделия или компонента в контролируемых лабораторных условиях, что предпочтительнее испытаний в реальных условиях эксплуатации по следующим причинам:

- Временная диаграмма удара поддается контролю и может быть воспроизведена в целях сравнения; кроме того, её можно изменять в диапазоне, выделенном из широко распространённых условий эксплуатации.

- В условиях лаборатории возможна запись удара и реакции на него в реальном масштабе времени для дальнейшего анализа.

- Время и средства, затрачиваемые на проведение нескольких полевых испытаний, целесообразнее использовать для выполнения множества лабораторных испытаний.

На временную диаграмму установки для ударных испытаний может оказывать влияние масса и распределение масс печатной сборки электронного модуля, особенно если масса образца значима в сравнении с массой установки.

Вид временной диаграммы удара выбирается исходя из ожидаемого воздействия на образец испытания.

4. Определение времени испытаний

При проведении производственных испытаний электрорадиоизделий (ЭРИ) импортного производства важно определить рациональное время испытаний. Такая задача на данном этапе является нетривиальной. Будем считать, что зависимость параметров ЭРИ от времени можно описать линейной моделью следующего вида:

$$Y(t_i) = b_0 + b_1 t_i + e_{t_i}, \quad (2)$$

где β_0 , β_1 – неизвестные (неслучайные) коэффициенты; e_{t_i} – случайная величина, дисперсия которой σ^2 не зависит от времени t_i , а ковариация случайных величин e_{t_i} и e_{t_j} равна нулю при $i \neq j$.

Это можно принять, т.к. количество измеренных параметров ЭРИ в процессе испытаний невелико и, следовательно, выбор модели более высокого порядка нецелесообразен.

Оценив математические ожидания и дисперсии параметров ЭРИ, можем оценить сверху вероятность выхода значений этих параметров для надежных изделий за границы условного отказа. А именно, вероятность p того, что значение параметра Π_i для надежного ЭРИ превысит границу условного отказа,

равную y_{yo} , как следует из неравенства Чебышева, меньше или равна следующей величины:

$$P_{\Pi_i} \leq \frac{s^2}{(y_{yo} - b_0)^2}. \quad (3)$$

Таким образом, вероятность того, что надежное изделие будет в процессе испытаний классифицировано как потенциально ненадежное, пренебрежимо мала. Рассчитаем теперь длительность испытаний такую, что вероятность того, что потенциально ненадежное изделие будет классифицировано как надежное, была бы пренебрежимо малой.

Для этого необходимо, прежде всего, оценить вероятности выхода измеряемых параметров P_{Π_i} потенциально ненадежного ЭРИ за границу условного отказа.

Пусть произведено n измерений параметра ЭРИ. Тогда вероятность p_z того, что z измерений превысили границу условного отказа задается биномиальным распределением:

$$p_z = C_n^z p^z (1-p)^{n-z}, \quad (4)$$

где p - вероятность выхода параметра потенциально ненадежного ЭРИ за границу условного отказа при одном измерении. Таким образом, задача оценивания вероятности выхода измеряемого параметра потенциально ненадежного ЭРИ по выборке результатов измерений в процессе испытаний есть задача оценивания параметра биномиального распределения. Как известно, оценкой, дисперсия которой равна минимальной границе дисперсии (МГД-оценкой), для параметра p биномиального распределения является

$$\hat{p} = \frac{z}{n}, \quad (5)$$

где z - число превышений границы условного отказа в выборке;
 n - объем выборки.

Дисперсия такой оценки равна

$$D = \frac{p(1-p)}{n}. \quad (6)$$

Вероятность того, что при k измерениях параметр ненадежного ЭРИ ни разу не превысит границы условного отказа оценивается величиной $(1 - \hat{p})^k$.

Пусть у нас имеется 2 критичных параметра ЭРИ: Π_1 и Π_2 . Тогда, при существующей длительности испытаний, вероятность отнести потенциально ненадежное ЭРИ к надежным (то есть вероятность того, что ни значение Π_1 , ни значение Π_2 ни разу не превысят границы условного отказа) оценивается величиной:

$$(1 - P_{\Pi_1})^k (1 - P_{\Pi_2})^k = a. \quad (7)$$

Если доля невыявленных потенциально ненадежных ЭРИ велика, время испытаний необходимо увеличить. Пусть доля невыявленных в процессе испытаний потенциально ненадежных транзисторов не должна превышать a_f . Количество измерений, необходимое для этого, определим как наименьшее целое k , удовлетворяющее неравенству:

$$[(1 - P_{\Pi_1})(1 - P_{\Pi_2})]^k \leq a, \quad (8)$$

а время испытаний t_{ucn} вычислим как

$$t_{ucn} = (k - 1)T, \quad (9)$$

где T - период времени между измерениями.

Библиографический список

1. Молин, С.М. Проблемы обеспечения динамических испытаний сложных изделий машиностроения [Текст] /С.М. Молин // Приборостроение в XXI веке – 2011. Интеграция науки, образования и производства: сб. материалов VII Всероссийской НТК. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2012. - С. 64-70.

2. Парафеев, С.Г. Методы и средства динамических испытаний конструкций летательных аппаратов: учеб. пособие [Текст] / С.Г. Парафеев, И.К. Туркин. – М.: Изд-во МНИ, 2002. – 132 с.

3. Вибрации в технике: справочник в 6 т. Т.5. Измерения и испытания [Текст] / ред. совет: В.Н. Челомей (пред.); под ред. М.Д. Генкина. – М.: Машиностроения, 1981. – 496 с.

4. Наседкин, А.В. Методика ускоренных исследовательских испытаний паяных соединений поверхностно-монтажных электрорадиоизделий [Текст] / А.В. Наседкин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 7(31). – С.153-157.

5. Федоров, В.К. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств

[Текст]/ В.К. Федоров, Н.П. Сергеев, А.А. Кондрашин. - М.: Техносфера, 2005. – 504 с.

6. Наседкин, А.В. Технологические испытания сложных электронных модулей космической аппаратуры с SMT – монтажом [Текст] / А.В. Наседкин, М.Н. Пиганов // Самолетостроение России. Проблемы и перспективы: матер. симпоз. с междуна. уч. – Самара: СГАУ, 2012. – С. 284-285.

METHOD OF PRODUCTION TESTING OF ELECTRONIC PARTS

© 2012 A. V. Nasedkin, S. V. Tyulevin, M. N. Piganov

²Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

An algorithm for production tests of electronic components is proposed. The features of dynamic tests are considered. Test exposures are selected. The time of the test for the linear model parameter changes electrical radio products was determined.

Production tests, algorithm, test impact, linear model, test time.

Информация об авторах

Наседкин Алексей Васильевич, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kipres@ssau.ru. Область научных интересов: испытания электронных узлов космической аппаратуры.

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

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. Область научных интересов: надёжность и качество радиоэлектронных средств.

Nasedkin Aleksey Vasilyevich, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kipres@ssau.ru. Area of scientific: testing electronic components of spacecraft.

Tyulevin Sergei Viktorovich, candidate of technical sciences, assistant professor of design and production radio-electronic means, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kipres@ssau.ru. Area of scientific: quality and reliability of space-based radioelectronic means.

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. Korolyov (National Research University). E-mail: piganov@ssau.ru. Area of scientific: quality and reliability of radio-electronic equipment.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СИГНАЛА АРТЕРИАЛЬНОЙ ПУЛЬСАЦИИ КРОВИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕБРАЗОВАНИЙ

© 2012 Л. И. Калакутский, А. А. Федотов

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

В статье рассматривается использование методики цифровой обработки биосигналов артериальной пульсации крови человека в условиях присутствия двигательных артефактов на основе применения кратномасштабных вейвлет-преобразований. Предложена структурная блок-схема для обработки сигнала артериальной пульсации крови, включающая в себя этапы декомпозиции и реконструкции биосигнала. Показана высокая эффективность использования предлагаемого метода цифровой обработки сигнала артериальной пульсации крови на основе применения дискретных вейвлет-преобразований по сравнению с использованием классического метода на основе фильтрации скользящего среднего.

Сигнал артериальной пульсации крови, цифровая фильтрация биосигналов, кратномасштабное вейвлет-преобразование.

Регистрация и обработка сигнала артериальной пульсации крови находит широкое применение в инструментальных системах кардиологической диагностики для мониторинга частоты сердечных сокращений, определения степени насыщения гемоглобина артериальной крови кислородом, исследования гемодинамических процессов в артериальном русле [1, 2].

Регистрация сигнала артериальной пульсации крови с помощью плетизмографических или сфигмографических датчиков сопровождается наличием помех физической и физиологической природы. Помехи электрической природы возникают в усилительном тракте систем регистрации сигнала артериальной пульсации крови в результате влияния внешних электромагнитных полей, создаваемых, главным образом, электрической сетью питания [2, 3]. Помехи физиологического происхождения можно разделить на две группы: артефакты, обусловленные движениями пациента, и помехи, создаваемые дыханием пациента.

Дыхательные тренды, присутствующие в сигнале артериальной пульсации крови, искажают изолинию и форму биосигнала. Двигательные артефакты носят

случайный характер и приводят к наибольшим искажениям биосигнала. Обработка сигнала артериальной пульсации крови на фоне присутствия двигательных артефактов связана с рядом трудностей, заключающихся в том, что природа появления двигательных артефактов имеет случайный характер, а их частотные компоненты перекрываются с основной полосой частот сигнала артериальной пульсации крови, что затрудняет использование классических методов линейной частотной фильтрации.

В настоящее время перспективным направлением в области обработки биосигналов, искаженных широкополосными шумами и помехами, является фильтрация на основе использования дискретных вейвлет-преобразований [4]. Очистка сигналов от шума может быть реализована непосредственно удалением детализирующих коэффициентов высокочастотных уровней вейвлет-разложений [5].

Шумовые компоненты биосигналов, и особенно большие случайные выбросы значений сигналов, можно рассматривать в виде множеств локальных особенностей сигналов. Процедура вейвлет-преобразования сигнала является, по сути, результа-

том фильтрации исходного сигнала фильтром с конечной импульсной характеристикой, представляющей собой дискретизированные отсчеты материнского вейвлета.

Дискретное вейвлет-преобразование включает в себя стадию декомпозиции сигнала и стадию реконструкции сигнала. Декомпозиция сигнала представляет собой фильтрацию исходного сигнала с помощью низкочастотных фильтров, импульсная характеристика которых представляет собой аппроксимирующие коэффициенты, и высокочастотных фильтров, отсчеты импульсной характеристики которых представляют собой детализирующие коэффициенты [5]. После стадии декомпозиции сигнала происходит удаление “шумовых компонент сигнала” с последующей реконструкцией исходного сигнала, очищенного от шумов и помех.

Основу предлагаемой методики составляет использование пороговых функций различной формы, на основе которых происходит ограничение уровня детализирующих коэффициентов вейвлет-преобразования. Задав определенный порог и «отсекая» коэффициенты ниже этого порога, можно значительно снизить уровень шума. Согласно теории вейвлет-преобразований, низкочастотные (аппроксимирующие) коэффициенты вейвлет-разложения обладают большей энергией сигнала, что делает их более важными для использования на стадии реконструкции. Высокочастотные (детализирующие) коэффициенты вейвлет-разложения обладают меньшей энергией сигнала, и зачастую представляют собой шумовые компоненты исходного сигнала [4]. Таким образом, в задачах фильтрации сигнала представляется целесообразным отбросить детализирующие коэффициенты вейвлет-разложения, получаемые на ранних стадиях декомпозиции сигнала.

Основными этапами предлагаемого алгоритма являются:

1. Вычисление прямого вейвлет-преобразования сигнала (выбор типа вейвлет-функции и числа уровней вейвлет-разложения).

2. Изменение полученных коэффициентов преобразования по определенному правилу (выбор алгоритма нахождения порогового значения, выбор пороговой функции, выбор стратегии обработки детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения).

3. Вычисление обратного вейвлет-преобразования от множества модифицированных (обработанных) вейвлет-коэффициентов.

На рис. 1 приведена структурная схема декомпозиции сигнала артериальной пульсации крови, включающая обработку сигнала высокочастотным и низкочастотным фильтрами и процедуры децимации (здесь: $H(n)$ – импульсная характеристика высокочастотного фильтра, $G(n)$ – импульсная характеристика низкочастотного фильтра), а также зависимости изменения сигнала от времени на различных этапах обработки.

На рис. 2 приведена блок-схема обработки сигнала артериальной пульсации крови на основе применения вейвлет-преобразования. На первом этапе обработки осуществляется декомпозиция исходного сигнала, далее детализирующие коэффициенты, полученные на ранних стадиях приравниваются к нулю, а на поздних стадиях проходят пороговую обработку, на заключительном этапе осуществляется реконструкция сигнала, включающая в себя процедуры интерполяции и обратного вейвлет-преобразования.

Качество фильтрации сигнала будет определяться выбором значения порогового уровня. В качестве порога в данной работе предлагается использовать значение, определяемое следующим образом:

$$T = p \cdot \sqrt{2 \ln(N)}, \quad (1)$$

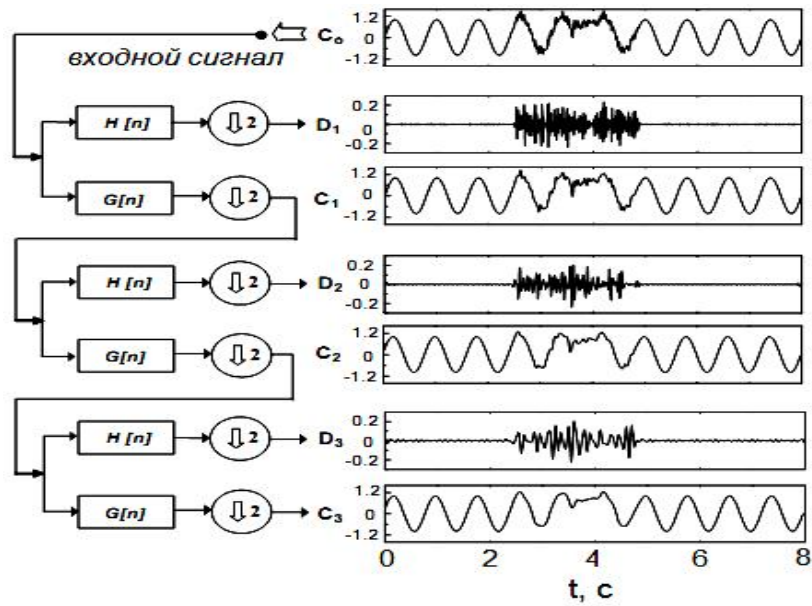


Рис. 1. Структурная схема обработки сигнала на стадии декомпозиции и зависимости изменения биосигналов на различных этапах обработки от времени

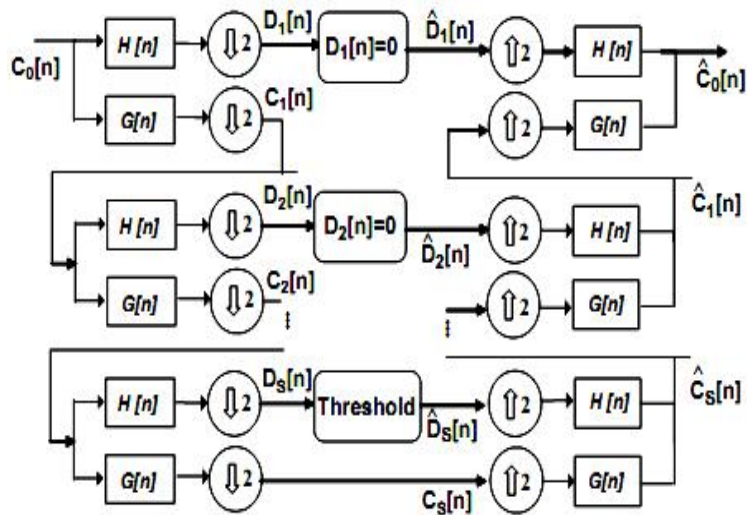


Рис. 2. Блок-схема обработки сигнала артериальной пульсации крови на основе применения вейвлет-преобразования

где T – пороговое значение; N – общее количество отсчетов обрабатываемого сигнала; p – медиана абсолютного значения последовательности детализирующих коэффициентов, лежащих на самом низком уровне разложения.

В данной работе в качестве материнского вейвлета использовался вейвлет Добеши, число уровней вейвлет-разложений было равно 4, при этом была использована жесткая пороговая функция.

Альтернативным и более простым методом обработки сигнала артериальной пульсации крови может служить фильтрация во временной области на основе использования фильтра скользящего среднего (ФСС) [6]:

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x(n-j),$$

где $x(n)$ – входной сигнал; N – ширина скользящего окна; $y(n)$ – выходной сигнал.

Применение ФСС приводит к сглаживанию исходного сигнала и обычно используется для устранения ошибок квантования и для устранения высокочастотных шумов в сигнале. Свойства такого рода фильтров полностью определяются шириной скользящего окна N , которая в свою очередь будет зависеть от величины частоты дискретизации обрабатываемого сигнала.

Оценкой эффективности использования той или иной методики фильтрации сигнала артериальной пульсации крови в условиях присутствия дыхательных помех и двигательных артефактов может служить чувствительность обнаружения опорных точек биосигнала, в качестве которых наиболее удобно использовать точку систолического максимума сигнала. Чувствительность обнаружения (S) оценивается как относительная доля успешно обнаруженных опорных точек (P^+) к общему числу опорных точек (P) в рассматриваемом фрагменте биосигнала. Обнаружение точки систолического максимума

сигнала происходит на основе трехточечной схемы детектирования [6].

Для регистрации биосигналов использовался сертифицированный компьютерный фотоплетизмограф “ЭЛДАР”, позволяющий регистрировать сигналы периферической артериальной пульсации крови и передавать данные в компьютер с частотой дискретизации 500 Гц. В качестве различных вариантов цифровой фильтрации сигнала артериальной пульсации крови в данной работе использовались предлагаемая методика на основе вейвлет-преобразований сигнала, а также методика на основе применения ФСС, реализуемого при различных значениях ширины скользящего окна.

В табл. 1 приведены значения эффективности обнаружения опорных точек сигнала артериальной пульсации крови для 12 различных фрагментов сигнала артериальной пульсации крови, искаженного дыхательными помехами и двигательными артефактами различной интенсивности.

Таблица 1. Эффективность обнаружения опорных точек сигнала артериальной пульсации крови на основе использования ФСС и вейвлет-преобразований

Обследуемый	A	B	C	D	E	F
P, шт	123	109	115	93	176	135
P ⁺ (вейв.), шт	122	106	114	82	166	134
P ⁺ (ФСС), N=250, шт	115	99	108	76	123	128
P ⁺ (ФСС), N=125, шт	114	104	113	69	161	130
P ⁺ (ФСС), N=62, шт	114	69	106	76	155	125
S (вейв.), %	99,2	97,3	99,1	88,2	94,3	99,3
S (ФСС), N=250, %	93,5	90,8	93,9	81,7	69,9	94,8
S (ФСС), N=125, %	92,7	95,4	98,3	74,2	91,5	96,3
S (ФСС), N=62, %	92,7	63,3	92,2	81,7	88	92,6
Обследуемый	G	H	I	J	K	Среднее значение
P, шт	149	114	131	117	145	
P ⁺ (вейв.), шт	147	113	129	114	141	
P ⁺ (ФСС), N=250, шт	128	105	119	96	113	
P ⁺ (ФСС), N=125, шт	141	105	125	93	135	
P ⁺ (ФСС), N=62, шт	144	89	120	62	127	
S (вейв.), %	98,6	99,1	98,5	97,4	97,2	
S (ФСС), N=250, %	85,9	92,1	90,8	82,1	77,9	
S (ФСС), N=125, %	94,6	92,1	95,4	79,5	93,1	
S (ФСС), N=62, %	96,6	78,1	91,6	53	87,6	

Анализ полученных результатов показал, что применение методики обработки сигнала артериальной пульсации крови на основе использования вейвлет-преобразований позволяет получить максимальную чувствительность обнаружения опорных точек биосигнала, близкую к 100%, в то время как фильтрация сигнала на основе использования ФСС дает заметно худшую чувствительность. Необходимо отметить, что использование скользящего окна с шириной, равной $\frac{1}{4}$ от величины частоты дискретизации ($N=125$), позволяет обеспечить наилучшую чувствительность обнаружения опорных точек биосигнала.

Несмотря на заметно более высокую чувствительность обнаружения опорных точек биосигнала, достигаемую при использовании методики обработки на основе применения вейвлет-преобразований, необходимо заметить, что реализация фильтрации биосигнала с помощью ФСС обладает неоспоримым преимуществом в быстродействии и простоте алгоритмической реализации, поэтому применение ФСС может быть целесообразным в системах оперативного мониторинга при обработке в режиме реального времени, в то время как использование вейвлет-

преобразований может быть реализовано при offline обработке биосигналов.

Библиографический список

1. Allen, J. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement [Текст] / J. Allen // *Physiological Measurement*. – 2007. – Vol. 28. – P. 1-39.
2. Webster, J.G. Design of Pulse Oximeters [Текст] / J.G. Webster – *The Medical Science Series*, Taylor & Francis, 1997. – 260 p.
3. Калакутский, Л.И. Аппаратура и методы клинического мониторинга: Учебное пособие [Текст] / Л.И. Калакутский, Э.С. Манелис. – Самара: СГАУ, 1999. – 160 с.
4. Fu, T.H. Heart rate extraction from photoplethysmogram waveform using wavelet multi-resolution analysis [Текст] / [Т.Н. Fu et al] // *Journal of medical and biological engineering*. – 2008. – Vol. 28 (4). – P. 229-232.
5. Strang, G. Wavelets and Filters Banks. [Текст] / G. Strang, T. Nguyen. – Wellesley-Cambridge-Press, 1996. – 490 p.
6. Рангайян, Р.М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход [Текст] / Пер. с англ. Под ред. А.П. Немирко – М.: Физматлит, 2007. – 440 с.

DISTAL ARTERIAL PULSE SIGNAL PROCESSING METHOD BASED ON WAVELET TRANSFORMS

© 2012 L.I. Kalakutskiy, A.A. Fedotov

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

This article is devoted to the distal arterial pulse signal processing method in the presence of motion artifact based on the multiresolution wavelet transform. The block diagram of the distal arterial pulse signal processing method composed of two stages of signal decomposition and signal reconstruction was proposed. The high efficiency of the proposed distal arterial pulse signal processing method based on discrete wavelet transform over using classical method based on the moving average filter was shown.

Distal arterial pulse, digital biosignals processing, multiresolution wavelet transform.

Информация об авторах

Калакутский Лев Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: bme@ssau.ru. Область научных интересов: моделирование биотехнических систем, разработка неинвазивных систем кардиологической диагностики, измерительные преобразователи биологической информации.

Федотов Александр Александрович, кандидат технических наук, ассистент кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: fedoaleks@yandex.ru. Область научных интересов: цифровая обработка биосигналов, измерительные преобразователи биологической информации.

Kalakutskiy Lev Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, head of radioengineering and biomedical engineering department. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: bme@ssau.ru. Area of scientific: modeling of biotechnical systems, development systems noninvasive cardiac diagnostic, measuring transducers of biological information.

Fedotov Alexander Alexandrovich, candidate of technical sciences, assistant professor of radioengineering and biomedical engineering department. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: fedoaleks@yandex.ru. Area of scientific: digital processing of biosignals, transducers of biological information.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ОПЫТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ НА РАННИХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

© 2012 А. В. Затылкин, Д. А. Голушко, А. В. Лысенко

Пензенский государственный университет

В статье показана актуальность опытно-теоретического метода при проведении проектных исследований моделей радиоэлектронных средств (РЭС). Доказана необходимость применения экспертных систем на всех этапах разработки РЭС. Предложен алгоритм проведения проектных исследований РЭС опытно-теоретическим методом, позволяющим за счет применения экспертных систем повысить эффективность проектных решений.

Алгоритм, экспертные системы, проектные исследования, радиоэлектронные средства, опытно-теоретический метод.

Введение

В настоящее время при разработке, испытаниях и эксплуатации радиоэлектронных средств (РЭС) огромную роль играют такие экономические факторы как высокие затраты материальных, человеческих и денежных средств [1,2]. Поэтому разработчикам все больше внимания приходится уделять построению именно математических моделей РЭС.

Тем не менее, использование только математических моделей существенно ограничивает область исследований РЭС по следующим причинам:

- Обработка отдельных подсистем осуществляется по ограниченному объему информации, что приводит к неточностям структурного и параметрического описания подсистем, а затем к появлению ошибок в описании системы и определении выходных характеристик РЭС.

- Существующие методы математического моделирования имеют свои отличительные особенности, накладывающие различные ограничения на область их применения (исследование конструкции РЭС в динамике или статике, описание граничных условий и т.д.), что требует постоянного уточнения полученной модели. Поэтому без дополнительных исследований нельзя пренебречь влиянием этих ошибок на точность расчета выходных оценок.

Конечно, для простых систем можно

создать только математическую модель или только опытный образец и провести все необходимые испытания и исследования, по результатам которых принять проектное решение.

Для сложных систем, которыми в большинстве случаев и являются РЭС, такой подход неприемлем. Например, трудно представить создание для целей исследования опытного образца крупного автоматизированного предприятия в металлургической промышленности. Такой эксперимент привел бы к огромным материальным затратам и значительному увеличению сроков ввода объекта.

Именно поэтому целесообразно использовать опытно-теоретический метод. Накопленный опыт разработки сложных систем позволил ученым под руководством профессора В.А. Ренева сформулировать основные положения опытно-теоретического метода проведения исследований, основанного на объединении разнородной информации, полученной при различных видах испытаний и эксплуатации [3].

Достоинства и недостатки опытно – теоретического метода

Основные положения этого метода следующие: содержательное описание задачи, связанной с оценкой эффективности, представляющее собой первый шаг на пути к ее формализации; уточнение степени и ха-

рактера функциональной зависимости показателя эффективности от характеристики элементов системы и внешних условий; установление обобщенных параметров; определение требований по точности и достоверности искомых оценок; отбор релевантных факторов по априорным и др. данным; определение условий испытаний с помощью факторного планирования и выбор соответствующих методов оценки истинных характеристик при использовании различного рода информации о системе и ее элементах (математическое моделирование, применение имитаторов, натурный эксперимент); обоснование и выбор приемлемого состава и структуры необходимых моделей и имитаторов; планирование и организация натурных экспериментов, обоснование объема испытаний и количества экспериментов; отработка и калибровка математических моделей по результатам испытаний; оценка показателей эффективности.

Поскольку, как показала практика, подобный подход позволяет создать работоспособную модель сложной мехатронной системы и достичь требуемой точности результатов моделирования, в данной статье проведена конкретизация этого метода для другой предметной области, а именно для проведения исследований программных и физических моделей РЭС.

Практическое применение опытно-теоретического метода исследований при разработке РЭС осложнено необходимостью обработки оператором большого объема информации и формализованных знаний, что требует введения экспертных систем и интеллектуальных методов. Поэтому необходимо разработать методику анализа программных и физических моделей радиотехнических устройств с возможностью работы оператора с проблемно-ориентированными экспертными системами.

Алгоритм проведения проектных исследований РЭС

Была разработана методика проведения опытно-теоретических исследований (математических) программных и физических моделей РЭС (рис.1), отличающаяся возможно-

стью работы оператора с проблемно-ориентированными экспертными системами.

В настоящее время проектировщики РЭС используют богатый арсенал систем автоматизированного проектирования (САПР), под которыми в России понимаются также и системы инженерного анализа. Это позволяет не только автоматизировать многие рутинные операции, но и частично повысить качество проектных решений, например, при разводке печатных плат, где трассировка проводников, как правило, проходит в автоматическом режиме с учетом необходимых параметров, выставленных оператором. Тем не менее, решение задачи оптимального расположения проводников (приводящее к уменьшению размеров печатной платы) такие системы ведут без учета различных дестабилизирующих факторов, таких как тепловые поля, внешние механические воздействия (удары и вибрации), влажность, ионизирующее воздействие и т.д.

Именно поэтому, после выполнения этапов, на которых разрабатывается схема электрическая принципиальная (рис. 1, блок 2), происходит размещение радиоэлементов на печатной плате (рис. 1, блок 3) и ее трассировка (рис. 1, блок 4), следует выделить необходимые контролируемые параметры РЭС (рис. 1, блок 5) и создать соответствующие математические модели (рис. 1, блок 6) с целью их всестороннего исследования (рис. 1, блок 7).

Провести правильную интерпретацию результатов, полученных при помощи программных систем инженерного анализа иногда довольно сложно [4,5]. В качестве примера рассмотрим результаты теплового анализа РЭС, где неверная компоновка радиоэлементов приводит к нарушению работы схемы из-за температурного градиента резисторов R3 и R4 (рис. 2).

Именно для решения этой задачи необходимо проводить анализ результатов моделирования с применением экспертных систем (ЭС), что в случае необходимости позволит выявить неочевидные недостатки проектного решения (в данном случае расположения элементов R3 и R4 на печатной плате).

Кроме того, существующие системы



Рис. 1. Алгоритм методики проведения опытно-теоретических исследований РЭС

инженерного анализа РЭС проводят анализ влияния тепловых, механических и других факторов без учета их взаимного влияния, что в некоторых случаях ведет к резкому отличию расчетных параметров системы от реальных.

Свести эту ошибку к минимуму можно различными способами – применением систем поддержки принятия решений (рис. 1,

блок 8), способных по результатам проведенных исследований внести корректировку в проектные решения (изменение теплового режима работы, изменение геометрии крепления, введение амортизаторов и др.), а также созданием (рис. 1, блок 12) и проведением исследований физической модели (прототипа) РЭС.

Особенностью проведения исследований физической модели РЭС (рис. 1, блок 13), также является сложность обработки полученной информации оператором и, зачастую, невозможность ее обработки без соот-

ветствующего специфического опыта работы [6]. Например, на рис. 3, б видно, что отсутствует верхняя гайка крепления печатной платы к стойке.

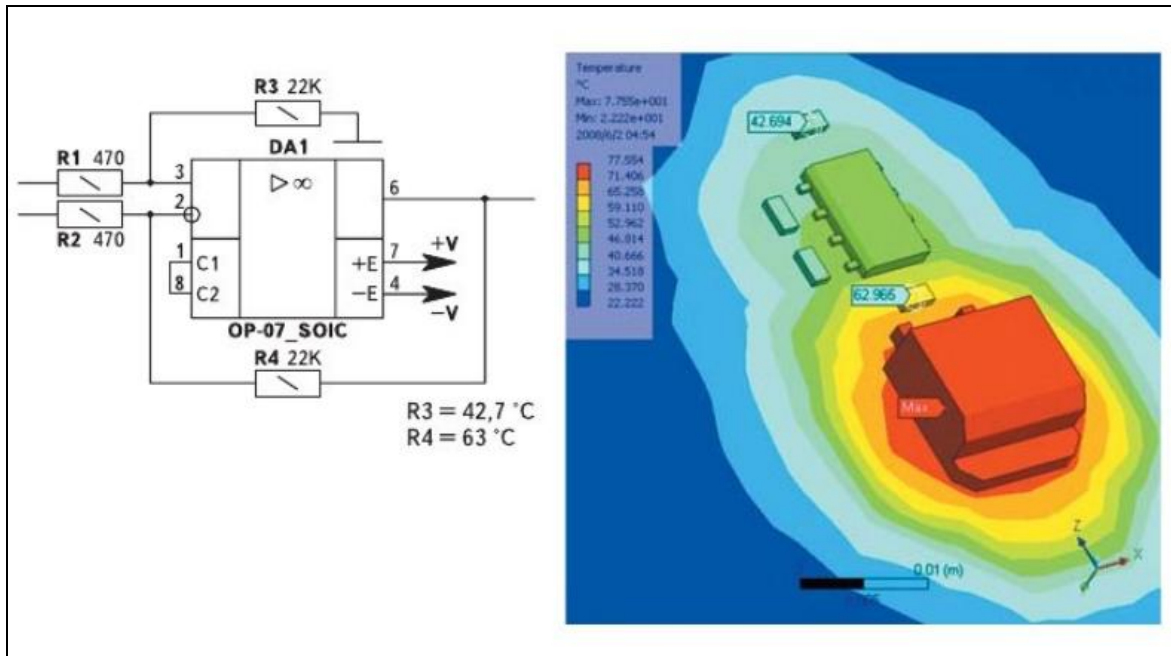
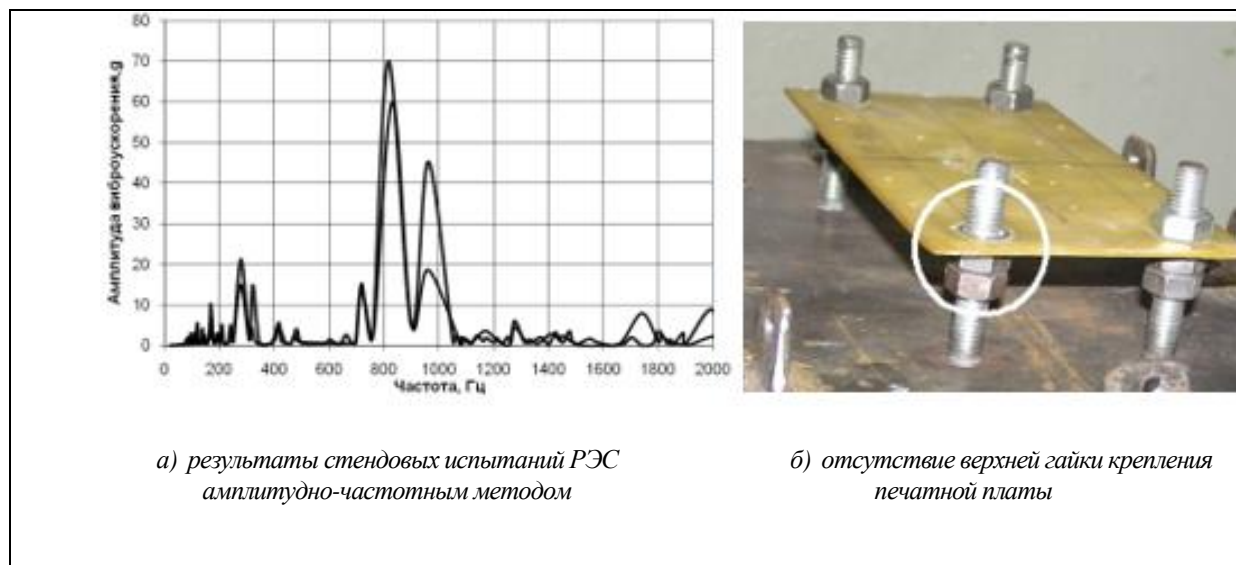


Рис. 2. Неверная компоновка радиоэлементов, приводящая к нарушению работы схемы из-за температурного градиента



а) результаты стендовых испытаний РЭС амплитудно-частотным методом

б) отсутствие верхней гайки крепления печатной платы

Рис. 3. Результаты стендовых испытаний РЭС амплитудно – частотным методом

Но по результатам стендовых испытаний РЭС амплитудно-частотным методом (рис. 3.3, а) это совершенно не очевидно. Поэтому применение ЭС на этапе интерпретации результатов исследования физических моделей РЭС, так же актуально, как и на этапе исследования их математических моделей.

Выводы

Таким образом, разработан алгоритм проведения опытно-теоретических исследований (математических) программных и физических моделей РЭС, отличающийся возможностью работы оператора с проблемно-ориентированными экспертными системами, введение которых на этапе анализа результатов проектных исследований позволяет повысить эффективность принятия проектных решений при создании современных радиотехнических устройств.

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Разработка программного комплекса, позволяющего повысить качество радиотехнических устройств за счет своевременного выявления скрытых дефектов» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013 гг.)», Гос. контракт № 14.740.11.0840 от 01 декабря 2010 г.

Библиографический список

1. Билибин, К.И. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учебник для вузов [Текст] /

К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева [и др.] / Под общ. ред. В.А. Шахнова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с.

2. Юрков, Н.К. Технология радиоэлектронных средств: учебник / [Текст] / Н.К. Юрков. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2012. – 717 с.

3. Наукова персодика Украсни [Электронный ресурс] // Проблемы оценки эффективности сложных мехатронных систем и использования опытно-теоретического метода. – Режим доступа: <http://www.nbu.gov.ua>.

4. Затылкин, А.В. Программная система оценки теплового режима конструкции РЭС [Текст] / А.В. Затылкин, И.И. Кочегаров, С.В. Крылов // Цифровые модели в проектировании и производстве РЭС: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2011. – Вып. 16. – С. 79-86.

5. Жаднов, В.В. Программные средства автоматизации проектных исследований надежности электронных средств [Текст] / В.В. Жаднов // Каталог САПР. Программы и производители. – М: Изд-во «СОЛЮ ПРЕСС», 2011. – С. 36-37.

6. Тумковский, С.Р. Виброакустический метод диагностирования бортовой электронной аппаратуры на стадиях жизненного цикла / [Текст] С.Р. Тумковский, Р.И. Увайсов, С.Б. Инжеллиден. С.У. Увайсов // Качество, инновации, образование. – 2007. № 9 (31). – С. 51-55.

RESEARCH METHODOLOGY OF RADIO ELECTRONIC DEVELOPMENT OF EARLY THEORETICAL METHODS IN THE DESIGN

© 2012 A. V. Zatylnkin, D. A. Golushko, A. V. Lysenko

Penza State University

The article shows the relevance of experimental and theoretical methods in conducting design studies of models of electronic means (REMs). The necessity of the use of expert systems in all phases of the development of REMs. An algorithm for the design of experimental studies REM theoretical method, which allows through the use of expert systems to increase the efficiency of the design decisions.

Algorithm, expert systems, design studies, electronic warfare, experimental and theoretical approach.

Информация об авторах

Затылкин Александр Валентинович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Пензенский государственный университет. E-mail: al.zatytkin@yandex.ru. Область научных интересов: моделирование и оптимизация в интеллектуальных системах проектирования и управления РЭС.

Голушко Дмитрий Александрович, аспирант кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Пензенский государственный университет. E-mail: dmitgoluschko@yandex.ru. Область научных интересов: моделирование и оптимизация в интеллектуальных системах проектирования и управления РЭС.

Лысенко Алексей Владимирович, аспирант кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Пензенский государственный университет. E-mail: lysenko7891@rambler.ru. Область научных интересов: моделирование и оптимизация в интеллектуальных системах проектирования и управления РЭС.

Zatytkin Alexander Valentinovich, candidate of technical sciences, assistant professor of design and manufacture of radio equipment, Penza State University. E-mail: al.zatytkin@yandex.ru. Area of scientific: modeling and optimization in intelligent systems design and management of REMs.

Golushko Dmitriy Alexandrovich, post-graduate student of design and manufacture of radio equipment, Penza State University. E-mail: dmitgoluschko@yandex.ru. Area of scientific: modeling and optimization in intelligent systems design and management of REMs.

Lysenko Aleksey Vladimirovich, post-graduate student of design and manufacture of radio equipment, Penza State University. E-mail: lysenko7891@rambler.ru. Area of scientific: modeling and optimization in intelligent systems design and management of REMs.

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ КЛЕТОЧНЫХ СУСПЕНЗИЙ МЕТОДОМ БИОИМПЕДАНСОМЕТРИИ

© 2012 С. А. Акулов, Р. Ю. Дорошенко

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

Предлагается оценить жизнеспособность клеточных суспензий с помощью оценки их биоэлектрических свойств. Разработана методика оценки состояния клеточных суспензий, основанная на методе импульсной импедансометрии.

Клеточные суспензии, электрический импеданс, переходная функция, пространство состояний, функциональная идентификация.

В современной медицине для заживления обширных ран и язв широко применяется метод активной терапии посредством клеточных суспензий (фибробластов, хондробластов, гемопоэтических клеток) – клеток соединительной ткани, определяющих активность процессов регенерации. Преимуществами этого метода лечения являются малое время культивирования, высокая степень заживления, возможность создания банка клеток. Однако эффективное лечение достигается при использовании качественного материала.

В настоящее время широко используются методики оценки жизнеспособности клеток, основанные на цитохимических, биохимических и цитоэнзиматических методах [1]. При этом предполагается предварительная обработка клеточного материала химическими препаратами для выявления различной степени интенсивности специфической окраски, позволяющей оценивать количество и локализацию исследуемых веществ в клетках. Основными недостатками вышеуказанных методов являются существенные временные затраты и субъективность получаемых результатов. Перспективным направлением является определение параметров биоэлектрического импеданса [2] исследуемых клеточных суспензий с целью дальнейшей оценки их степени жизнеспособности.

В последние годы измерения электрического импеданса используются для получения информации о внутренней структуре биологических тканей (определение уровня дегидратации организма человека, определение компонентного состава мышечной ткани, определение состояния клеточных структур). Актуальным направлением использования приборов измерения электрического импеданса является их включение в состав систем гемодиализа, а также создание приборов экспресс-определения состава крови. Важным направлением развития указанных приборов является также оценка концентрации клеточных суспензий с целью определения состояния жизнедеятельности клеточных суспензий в медицине клеточных технологий. Данная задача требует экспресс-определения биоэлектрического импеданса в широком диапазоне частот.

Существующие измерительные приборы биоэлектрического импеданса, построенные по распространённой схеме потенциометрических измерений, не позволяют проводить экспресс-измерение параметров электрического импеданса в широком диапазоне частот. Длительное воздействие электрическим током на биологический объект (клеточный материал), обусловленное использованием данных измерительных систем, может привести к необратимым изменениям его структуры и, как следствие, может внести ошибки в

определение частотных характеристик биоэлектрического импеданса, а, следовательно, привести к неточной оценке степени жизнеспособности клеточной суспензии.

В данной работе в качестве показателя степени жизнеспособности клеточной суспензии выбран показатель электрического импеданса, отражающий изменение структурного состава. В частности, предполагается, что снижение степени жизнеспособности клеточной суспензии обусловлено уменьшением концентрации дисперсной фазы суспензии, ввиду того, что нежизнеспособность клетки проявляется разрушением клеточной мембраны, и, как следствие, приводит к изменению структурного состава.

Предложена методика экспресс-оценки характеристик электрического импеданса клеточной суспензии путем анализа переходной функции импеданса [3]. В качестве переходной функции импеданса рассматривается реакция исследуемого объекта на тестовое воздействие. Для определения частотной характеристики составляющих электрического импеданса в качестве тестового воздействия используется ступенчатый ток, в качестве реакции – напряжение, возникающее на исследуемом объекте. После времячастотного преобразования данных частотная характеристика импеданса может быть преобразована в передаточную функцию импеданса. Операторный импеданс рассматривается в пространстве моделей, характеризующих электрические свойства многокомпонентных биологических тканей, что позволяет перейти к электрическим эквивалентам ее составляющих и, в частности, к структурной оценке исследуемых тканей [4]. Метод пространства состояний [5] позволяет представить модель, полученную в виде передаточной функции, в виде системы дифференциальных уравнений первой степени относительно переменных состояния, имеющих вполне определенный биофизический смысл.

В настоящей работе для определения операторного импеданса использован

вычислительный метод прямой подгонки E.Levy [6], определяющий с заданной точностью операторный импеданс по данным частотной характеристики в виде отношения полиномов:

$$Z(s) = N(s)/D(s). \quad (1)$$

Если предположить, что корни знаменателя различны, то выражение для операторного импеданса может быть приведено к дробно-рациональному виду:

$$Z(s) = d_0 + \sum_{i=1}^n c_i / (s - a_i), \quad (2)$$

где $d_0 = \lim_{s \rightarrow \infty} z(s)$, a_i, c_i – постоянные коэффициенты.

Соотношение между напряжением и током в операторной форме:

$$U(s) = d_0 \cdot I(s) + \sum_{i=1}^n I(s)c_i / (s - a_i). \quad (3)$$

Образует n – мерный вектор состояния:

$$q_i = I(s)/(s - a_i). \quad (4)$$

Теперь, переходя от изображений к оригиналам из (3) с учетом (4) получаем модель процессов, описывающих явление биоэлектрического импеданса с помощью уравнений вход – состояние – выход:

$$\begin{cases} Q' = A Q + i(t); \\ u(t) = C Q + d_0 i(t); \end{cases} \quad (5)$$

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 \\ \mathbf{M} \\ q_n \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_1 & \mathbf{K} & 0 \\ 0 & \mathbf{K} a_i \mathbf{K} & 0 \\ 0 & \mathbf{K} & a_n \end{bmatrix},$$

$$C = [c_{\mathbf{K}} c_n]. \quad (6)$$

Модель связывает входной ток, протекающий по исследуемому объекту, и выходное напряжение, регистрируемое на нем, через переменные состояния Q , которые, как нетрудно видеть, имеют размерность электрического заряда.

Коэффициент d_0 в рассматриваемой задаче имеет размерность сопротивления и представляет собой не зависящую от частоты составляющую импеданса, то есть отражает свойства тканей, имеющих чисто активное сопротивление.

Дифференциальные уравнения (5) характеризуют импедансные свойства структур тканей, обладающих резистивно-емкостным сопротивлением. Эти уравнения, имеющие апериодические решения, описывают прохождение электрического тока через параллельное соединение активного и емкостного сопротивления.

Таким образом, схема моделирования, отвечающая уравнению (5), имеет вид электрической эквивалентной схемы, изображенной на рис.1. Параметры модели R_i , C_i могут быть найдены из значений коэффициентов d_0 , a_i , c_i .

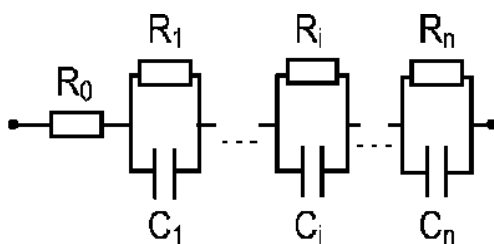


Рис. 1. Модель импеданса в виде эквивалентной электрической схемы

В данной работе в качестве экспериментального материала использовались клеточные суспензии хондробластов, взвешенных в растворе Хенкса. В результате исследований были получены частотные характеристики активной и реактивной составляющих электрического импеданса суспензии в различные моменты времени.

Для клеточных суспензий, имеющих многокомпонентную структуру, зависимость импеданса от частоты носит сложный характер. Для «низких» частот (< 1 Гц) абсолютная величина импеданса составляет сотни Ом и слабо зависит от частоты; далее, для «средних» частот (10 Гц...1 кГц), происходит спад импеданса до уровня десятков Ом, а затем, при увеличении частоты в область более «высоких» частот, импеданс изменяется слабо.

Количество переменных состояния модели (5) определяет структуру эквивалентной схемы. При выборе ошибки аппроксимации экспериментальной частотной характеристики более 10% число переменных состояния модели уменьшается. Так, для $n = 1$ полученная модель состоит из трех элементов. По своей структуре она отличается от вида трехэлементной модели Na_{na1} , используемой для моделирования биологических сред [7], однако, частотные характеристики моделей при определенных соотношениях элементов совпадают, так как описывают один и тот же процесс.

На основании предложенной методики оценки структурного состава суспензии с однокомпонентной дисперсионной фазой была получена электрическая эквивалентная схема замещения, показанная на рис. 2. Параметры эквивалентной схемы в различные моменты времени приведены в табл. 1.

Параллельно с вышеуказанным экспериментом осуществлялась оценка степени жизнеспособности цитохимическим методом с непосредственным подсчетом жизнеспособных клеток в камере Горяинова.

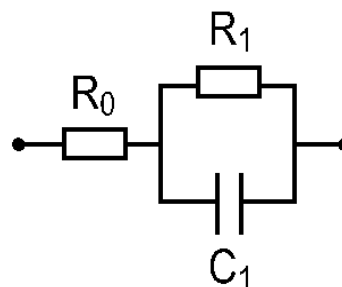


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения клеточной суспензии

Зависимости изменения параметра C_1 от момента времени измерения приведены на рис. 3.

Таблица 1. Изменение параметров эквивалентной схемы замещения электрического импеданса суспензии фибробластов в различные моменты времени

	R_0 , Ом	R_1 , Ом	C_1 , мкФ
Нач. момент	27	120	2341
Час спустя	25	115	2655
Два часа спустя	21	113	3012
Три часа спустя	19	110	3540
Четыре часа спустя	19	107	4335

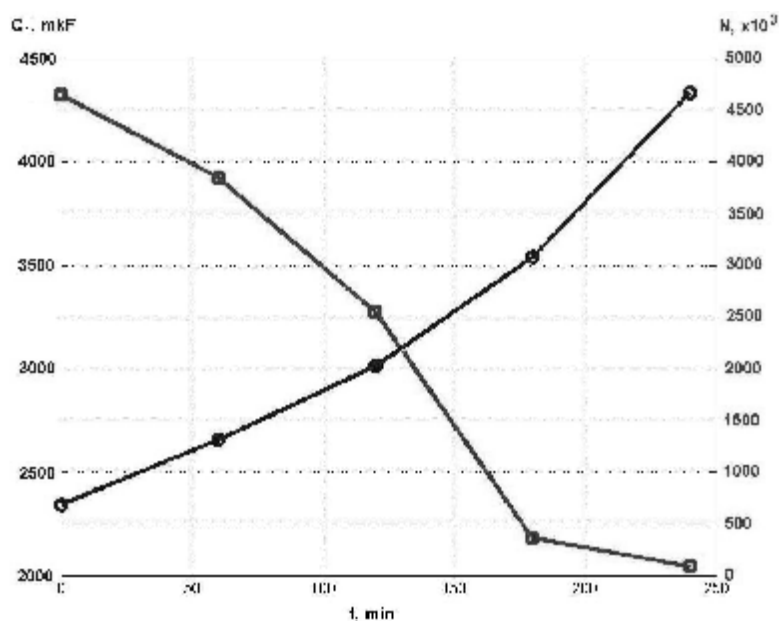


Рис. 3. Зависимость величины параметра C_1 и количества живых клеток N от времени измерения t

С течением времени происходит снижение количества жизнеспособных клеток. При этом отмечается возрастание параметра C_1 . Увеличение параметра C_1 может быть обусловлено продуктами распада клетки, вносящими существенный вклад в поверхностную площадь. На основании полученных данных можно предложить методику измерения степени жизнеспособности клеток по определению параметров эквивалентной схемы замещения клеточной суспензии.

Данный метод позволяет оценить степень жизнеспособности клеточных

суспензий с течением времени. При этом процесс измерения, т.е. воздействия на пробу клеточной суспензии, осуществляется в течение действия тестирующего импульса электрического тока, что позволяет получить быструю оценку степени жизнеспособности клеточной суспензии.

Библиографический список

1. Fletcher, D. Instrumental methods in electrochemistry [Текст] /D. Fletcher, R. Greef, R. Peat et al.// Horwood Publishing Ltd, Coll House, Westergate, Chichester, England, 2001. - P. 445.

2. Fricke, H. The Maxwell-Wagner dispersion in a suspension of ellipsoids [Текст]/H. Fricke // J. Phys. Chem. 1993. – P. 934-937.

3. Акулов, С.А. Оценка частотной характеристики биоэлектрического импеданса тканей методом анализа переходных функций [Текст] /С.А. Акулов,

Л.И. Калакутский // Сборник трудов Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» в 3-х томах. Т.1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – С. 499-501.

4. Bragos, R. Cell growing and differentiation monitoring system using electrical bioimpedance spectroscopy measurement on interdigitated microelectrodes [Текст] / R. Bragos, E. Sarro, H. Estruch, J. Farre//

The 3rd European Medical and Biological Engineering Conference November 20-25, 2005, EMBEC'05 Prague, Czech Republic IFMBE Proc. 2005 11(1). – P. 247-248.

5. Лошилов, В.И. Биотехнические системы электронейростимуляции [Текст] / В.И. Лошилов, Л.И. Калакутский // – М.: МГТУ, 1991. - 168 с.

6. Sanathanan, C. Transfer function synthesis as a ratio of two complex polynomials [Текст] / C. Sanathanan, J. Koerner // Automatic Control, IEEE Transactions on Volume 8, Issue 1, Jan 1963. – P. 56 – 58.

7. Smyet, S. Comparison of extracellular fluid volume measurement in children by $^{99}\text{Tc}^m$ – DPTA clearance and multi-frequency impedance techniques [Текст]/

S. Smyet, H. Nonvoedt// Physiol. Meas. 1994 (15). – P. 251-260.

CELL SUSPENSIONS STATUS MONITORING BY BIOIMPEDANCE METHOD

© 2012 S.A. Akulov, R.J. Doroshenko

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

In this paper we evaluate the viability of cell suspensions with the assessment of their bioelectric properties. A method for evaluation of cell suspensions, based on the method of pulse impedance.

Cell suspensions, electrical impedance, transfer function, state space, the functional identification.

Информация об авторах

Акулов Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sakulov1981@mail.ru. Область научных интересов: моделирование биотехнических систем, исследование биоэлектрического импеданса, измерительные преобразователи биологической информации.

Дорошенко Роман Юрьевич, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет) E-mail: RDssau@yandex.ru. Область научных интересов: цифровая обработка биосигналов, программирование микроконтроллеров.

Akulov Sergey Anatoljevich, candidate of technical sciences, assistant professor of radioengineering and biomedical engineering department. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: sakulov1981@mail.ru. Area

of scientific: modeling of biotechnical systems, the study of bioelectric impedance transducers of biological information.

Doroshenko Roman Jurjevich, student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: RDssau@yandex.ru. Area of scientific: digital processing of biosignals, programming microcontrollers.

РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВНУТРИ ОДНОРОДНЫХ КОРПУСОВ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

© 2012 А. В. Костин

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

Предложен метод расчёта напряжённостей электрического и магнитного полей внутри однородных экранов для определения характеристик электромагнитных помех внутри корпусов бортовой аппаратуры космических аппаратов в условиях воздействия электростатических разрядов. Приведены результаты экспериментов, подтверждающие адекватность предложенного метода.

Бортовая аппаратура, космический аппарат, электростатический разряд, электрическое поле, магнитное поле, магнитный поток, ток, ЭДС.

В последнее время наблюдается бурное развитие электроники. Увеличивается надёжность, срок службы, расширяются функциональные возможности радиоэлектронной аппаратуры. Всё это на фоне уменьшения габаритов и массы. Указанные общие тенденции не обходят стороной и бортовую аппаратуру (БА) космических аппаратов (КА). К сожалению, такая аппаратура не всегда стойка к импульсным электромагнитным помехам, таким как электростатический разряд (ЭСР). Они возникают из-за электризации различных элементов конструкции КА [1]. Чаще всего корпуса БА изготавливаются из металла и выполняют роль электромагнитных экранов.

При проведении теоретической оценки устойчивости БА к ЭСР необходимо определить поле внутри корпуса первой. Корпус БА является неоднородным. Под неоднородностями понимаются щели, отверстия и радиопрозрачные окна. Неоднородные электромагнитные экраны рассчитываются в два этапа. На первом этапе определяется поле внутри однородного экрана (поле, прошедшее сквозь стенки). На втором этапе – поле, прошедшее через неоднородности. Затем поля суммируются по принципу суперпозиции.

Оба этапа не могут быть рассмотрены в рамках одной статьи ввиду их объёмности. По этой причине рассмотрим лишь расчёт поля внутри однородного экрана.

Автором настоящей статьи был проведён анализ методик определения электромагнитного поля (ЭМП) внутри однородных экранов и выбрана методика, которая справедлива для квазистационарного поля, поскольку даёт достаточно точный результат [2]. Для использования такой методики необходимо выполнение условий:

$$\frac{c}{f_M} \gg l, \quad (1)$$

$$2p f_M \epsilon_0 e \ll s, \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме, f_M – максимальная частота в спектре разрядного импульса (для ЭСР – 168,3 МГц [3]), l – максимальный линейный размер корпуса БА, ϵ_0 – электрическая постоянная, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость, σ – удельная электрическая проводимость. Учитывая размеры корпусов БА и значение f_M , можно сказать, что условие (1) выполняется для корпусов БА. Выражение (2) справедливо для металлических материалов, из которых изготавливают корпуса БА.

Под воздействием электрического поля (рис. 1,а) в гранях экрана, перпендикулярных вектору $\vec{E}_y(t)$, происходит разделение свободных зарядов 1 и 1', 2 и 2', как это показано на рис. 1, б. Одновременно с этим заряды 1' перетекают и компенсируют 2. Результатом этих процессов является возникновение компенсирующего электрического поля $\vec{E}_{k,y}(t)$ внутри экрана, когда его левая грань заряжается

отрицательно, а правая – положительно (рис. 1,в). Компенсирующее электрическое поле $\vec{E}_{k,y}(t)$, направленное навстречу воздействию полю $\vec{E}_y(t)$ (рис. 1,в), обеспечивает защитный эффект экрана. Поле $\vec{E}_{e,y}(t)$ внутри экрана определяется формулой

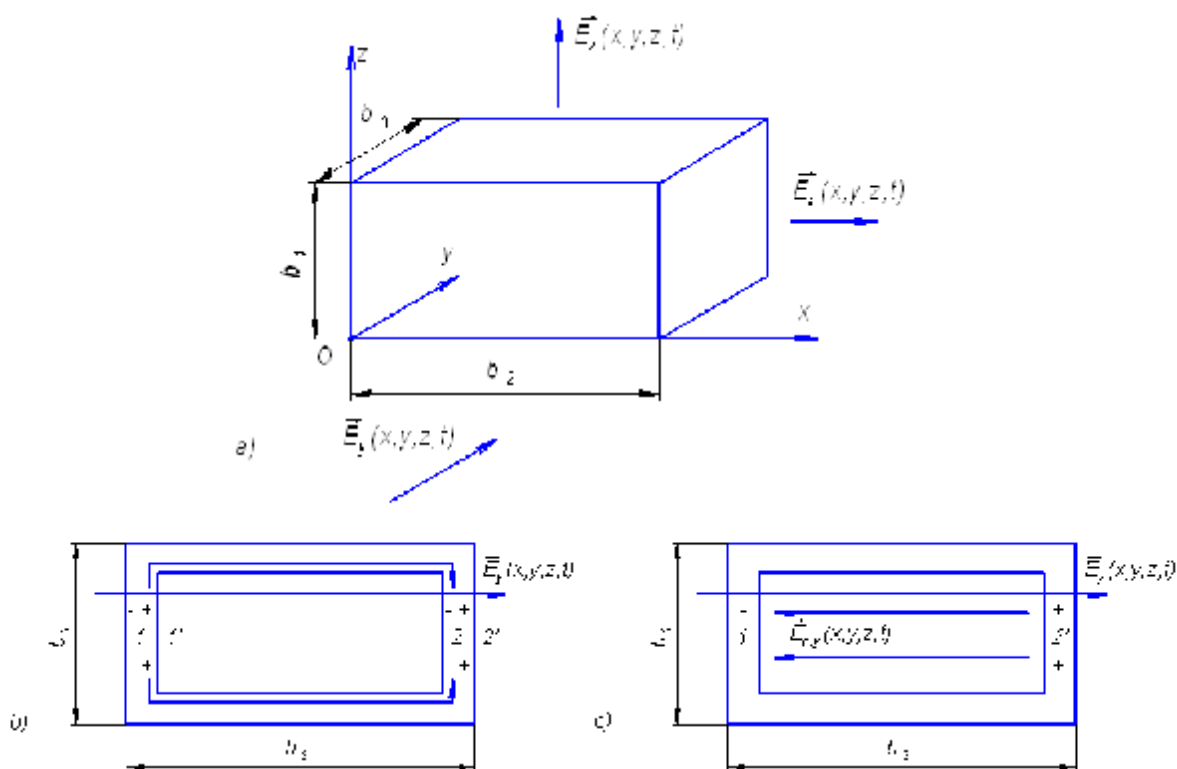
$$\vec{E}_{e,y}(t) = \vec{E}_y(t) - \vec{E}_{k,y}(t). \tag{3}$$


Рис. 1. Воздействие электрического поля на электромагнитный экран

Пусть на однородный электромагнитный экран в форме параллелепипеда (а корпуса БА КА чаще всего имеют именно такую форму) действует электрическое поле вызванное ЭСР

$$\vec{E}(t) = \vec{1}_x E_x(t) + \vec{1}_y E_y(t) + \vec{1}_z E_z(t). \tag{4}$$

Рассмотрим воздействие составляющей $E_y(t)$ на экран (рис. 1), а затем, распространим на остальные координаты. Согласно методике, описанной в [2], электрическое поле вызывает в стенках

экрана ЭДС

$$e_y(t) = \int_0^{b_3} E_y(t) dy. \tag{5}$$

Под действием $e_y(t)$ в гранях экрана, параллельных вектору $E_y(t)$, возникает переменный ток $i_y(t)$. Цепь, по которой течёт этот ток, можно представить в виде эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами (рис. 2). L_i, C_i, R_i – индуктивность, ёмкость и активное сопротивление экрана соответственно.

Индекс i равен x , если рассматривается воздействие составляющей $E_x(t)$. Индекс i равен y , если рассматривается воздействие

составляющей $E_y(t)$. Индекс i равен z , если рассматривается воздействие составляющей $E_z(t)$.

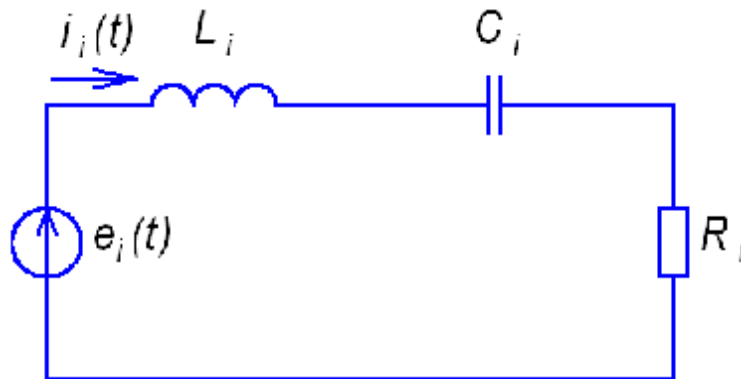


Рис. 2. Эквивалентная схема экрана

Ток в цепи, представленной на рис.2, можно определить из уравнения [2]

$$e_y(t) = R_y \cdot i_y(t) + L_y \frac{di_y(t)}{dt} + \frac{1}{C_y} \int i_y(t) dt \quad (6)$$

Компенсирующее поле можно определить из уравнения [2]

$$\int_0^{b_3} E_{к.у}(t) dy = L_y \frac{di_y(t)}{dt} + \frac{1}{C_y} \int i_y(t) dt \quad (7)$$

Решим эти уравнения операторным методом. Из выражения (6) получим ток

$$\begin{aligned} \mathcal{I}_y(p) &= \frac{\mathcal{E}_y(p)}{R_y + pL_y + 1/pC_y} = \\ &= \frac{pC_y}{p^2L_yC_y + pR_yC_y + 1} \int_0^{b_3} \mathcal{E}_y(p) dy \end{aligned} \quad (8)$$

где $p = \delta + j\omega$ – комплексная частота; δ – коэффициент затухания; j – мнимая единица; ω – угловая частота. Из формулы (7) выразим компенсирующее поле и подставим в него ток. При этом получим

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{к.у}(p) &= \frac{p^2C_yL_y + 1}{p^2L_yC_y + pR_yC_y + 1} \frac{d}{dy} \int_0^{b_3} \mathcal{E}_y(p) dy = \\ &= \frac{p^2C_yL_y + 1}{p^2L_yC_y + pR_yC_y + 1} \mathcal{E}_y(p) \end{aligned} \quad (9)$$

Индуктивность экрана можно найти по формуле, приведённой в [4]

$$L_y = \frac{\mu_0 b_3}{2p} \left(\ln \frac{2\sqrt{p}b_3}{\sqrt{b_1b_2}} - 1 - m_H \ln C_0 \right) \quad (10)$$

где μ_0 и μ_H – магнитная постоянная и относительная начальная магнитная проницаемость материала экрана соответственно; C_0 – функция поперечных размеров экрана, которая приведена в книге [4].

Ёмкость экрана можно определить как ёмкость конденсатора, образованного плоскостями экрана, на которых образуются заряды [2]:

$$C_y = \frac{\epsilon_0 b_1 b_2}{b_3} \quad (11)$$

В выражении (11) относительная диэлектрическая проницаемость равна единице. Это справедливо для вакуума и воздуха, внутри БА КА чаще всего бывает именно такая среда.

Сопротивление экрана определяется по формуле [2]

$$R_y = \frac{4b_3 + b_y}{8s(b_1 + b_2)d_y} \quad (12)$$

где σ – удельная электрическая проводимость материала стенок экрана; d – эффективная толщина стенок экрана; b – коэффициент, который определяется по формуле [2]

$$b_y = \begin{cases} b_1(3 - b_1/b_2), \text{ при } b_1 \leq b_2, \\ b_2(3 - b_2/b_1), \text{ при } b_1 \geq b_2. \end{cases} \quad (13)$$

Эффективная толщина стенок экрана учитывает скин-эффект

$$d_y = \frac{w_0 d_0 + I_{1,y}}{w_0 + G_{1,y}}. \quad (14)$$

Входящие в формулу (14) параметры определяются следующим образом:

$$w_0 = \frac{2}{m_0 S \cdot d_0^2}, \quad (15)$$

$$G_{1,y} = \int_{w_0}^{\infty} \frac{|\dot{I}_y(w)|^2}{|\dot{I}_y(0)|^2} dw, \quad (16)$$

$$I_{1,y} = \int_{w_0}^{\infty} \frac{|\dot{I}_y(w)|^2}{|\dot{I}_y(0)|^2} d(w) dw, \quad (17)$$

$$d(w) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{m_0 S w}}, \quad (18)$$

где $\dot{I}_y(w)$ равно $\dot{I}_y(p)$ при $p = jw$, то есть при коэффициенте затухания, равном нулю.

Итак, компенсирующее поле внутри экрана можно определить по формулам:

$$\dot{E}_{k,x}(p) = \frac{p^2 C_x L_x + 1}{p^2 L_x C_x + p R_x C_x + 1} \dot{E}_x(p);$$

$$\dot{E}_{k,y}(p) = \frac{p^2 C_y L_y + 1}{p^2 L_y C_y + p R_y C_y + 1} \dot{E}_y(p);$$

$$\dot{E}_{k,z}(p) = \frac{p^2 C_z L_z + 1}{p^2 L_z C_z + p R_z C_z + 1} \dot{E}_z(p). \quad (19)$$

Если принять коэффициент затухания комплексной частоты p равным нулю, то получим спектральную плотность электрического поля. В некоторых случаях для анализа можно использовать именно её, но если необходима временная зависимость, то выражения (19) необходимо подвергнуть обратному преобразованию Лапласа.

Рассмотрим воздействие магнитного поля на электромагнитный экран. Пусть на однородный электромагнитный экран в форме параллелепипеда действует магнитное поле, вызванное ЭСР

$$\dot{H}(t) = \dot{H}_x(t) + \dot{H}_y(t) + \dot{H}_z(t). \quad (20)$$

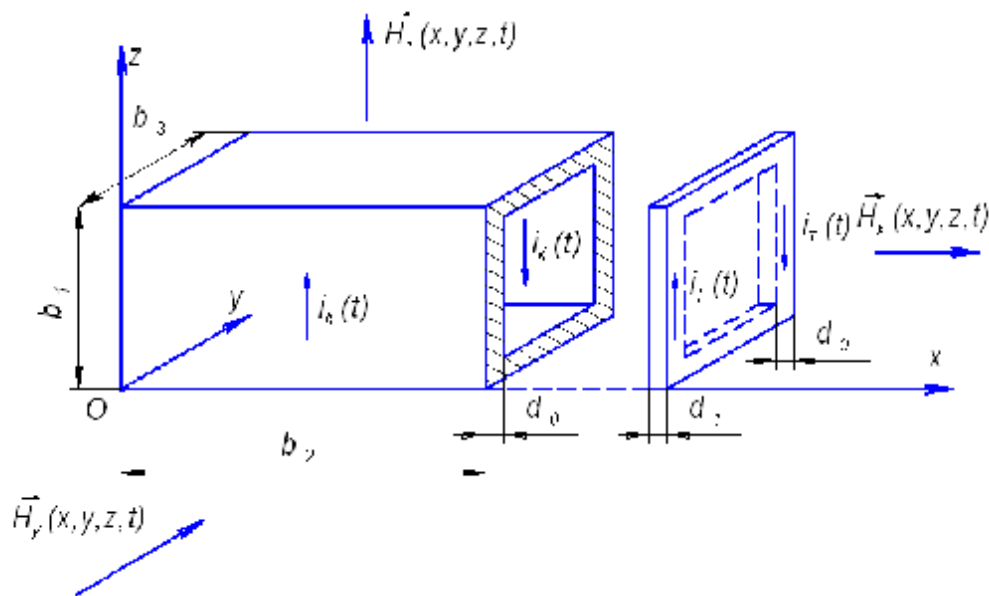


Рис. 3. Воздействие магнитного поля на электромагнитный экран

Согласно физико-математической модели, описанной в [2], поле внутри экрана определяется в два этапа. На первом этапе поле взаимодействует с торцевой гранью экрана. На втором этапе поле (как результат взаимодействия с торцевой гранью) взаимодействует с корпусом экрана.

Рассмотрим воздействие составляющей $H_x(t)$ на экран, представленный на рис. 3. На торцевую стенку с размерами b_1, b_3 действует магнитное поле с магнитной индукцией, равной произведению магнитной постоянной на проекцию вектора напряжённости магнитного поля на ось Ox $\mu_0 H_x(t)$. Поскольку на границе раздела торцевой стенки и воздушной среды нормальные составляющие линий магнитной индукции непрерывны [5], то магнитная индукция в торцевой стенке экрана будет равна

$$\dot{B}_x(t) = m_0 \dot{H}_x(t). \quad (21)$$

Под действием магнитной индукции в торцевой стенке наводится ЭДС

$$e_{T,x}(t) = -\frac{d}{dt} \int_S \dot{B}_x(t) dS, \quad (22)$$

где S – поверхность торцевой грани $b_1 b_3$. ЭДС, наведённая в торцевой грани экрана, вызывает ток $i_{T,x}(t)$. Торцевую стенку, по которой течёт этот ток, можно представить в виде эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами (рис. 4). $L_{T,i}, R_{T,i}$ – индуктивность и активное сопротивление торцевой стенки экрана соответственно; $L_{K,i}, R_{K,i}$ – индуктивность и активное сопротивление корпуса экрана соответственно. Индекс i равен x , если рассматривается воздействие составляющей $H_x(t)$. Индекс i равен y , если рассматривается воздействие составляющей $H_y(t)$. Индекс i равен z если, рассматривается воздействие составляющей $H_z(t)$. Запишем второй закон Кирхгофа для этой цепи

$$R_{T,x} i_{T,x}(t) + L_{T,x} \frac{di_{T,x}(t)}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \dot{B}_x(t) dS. \quad (23)$$

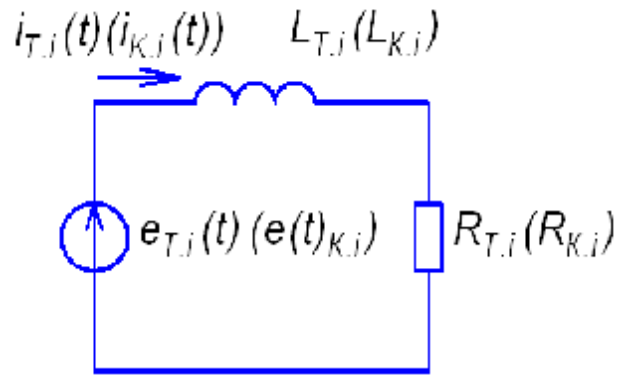


Рис. 4. Эквивалентная схема торца корпуса (экрана)

Ток $i_{T,x}(t)$ вызывает магнитное поле индукцией $\dot{B}'_x(t)$. Магнитную индукцию можно найти из уравнения

$$\frac{d}{dt} \int_S \dot{B}'_x(t) dS = L_{T,x} \frac{di_{T,x}(t)}{dt}. \quad (24)$$

Решив уравнение (23) операторным методом, получим

$$\begin{aligned} \dot{B}'_{T,x}(p) &= -\frac{p}{R_{T,x} + L_{T,x}p} \int_S \dot{B}_x(p) dS = \\ &= -\frac{p}{R_{T,x} + L_{T,x}p} \dot{B}_x(p), \end{aligned} \quad (25)$$

где $\dot{B}_x(p)$ – магнитный поток вектора $\dot{B}_x(p)$ через площадку S .

Теперь решим уравнение (24) операторным методом

$$\dot{B}'_{T,x}(p) = \frac{1}{L_{T,x}} \int_S \dot{B}_x(p) dS = \frac{\dot{B}_x(p)}{L_{T,x}}, \quad (26)$$

где $\dot{B}_x(p)$ – магнитный поток вектора $\dot{B}_x(p)$ через площадку S .

Приравняв правые части (25) и (26) и выразив $\dot{B}_x(p)$ через $\dot{B}'_x(p)$, получим

$$\dot{B}'_x(p) = -\frac{L_{T,x}p}{R_{T,x} + L_{T,x}p} \dot{B}'_x(p). \quad (27)$$

Результирующий магнитный поток в торце экрана будет равен сумме $\dot{B}'_x(p) + \dot{B}_x(p)$ (по принципу суперпозиции)

$$\dot{B}'_x(p) = \frac{R_{T,x}}{R_{T,x} + L_{T,x}p} \dot{B}_x(p). \quad (28)$$

Если в (28) выразить магнитные потоки через векторы магнитной индукции (через интегралы по поверхности S), внести под знак интеграла выражений перед интегралом в правой части как константу $R_{T,x}/(R_{T,x}+L_{T,x}p)$ и продифференцировать обе части по S , то получим

$$\mathbb{B}_x(p) = \frac{R_{T,x}}{R_{T,x} + L_{T,x}p} \mathbb{B}_x(p). \quad (29)$$

Поскольку на границе раздела торцевой стенки и воздушной среды нормальные составляющие линий магнитной индукции непрерывны [5], то магнитная индукция в полости экрана будет равна результирующей магнитной индукции в торце экрана. Теперь результирующее поле взаимодействует с корпусом экрана. Для определения поля внутри экрана необходимо проделать те же операции, что и для определения результирующего поля торцевой стенки [2]. Получим

$$\mathbb{B}_{p,x}(p) = \frac{R_{K,x}}{R_{K,x} + L_{K,x}p} \times \frac{R_{T,x}}{R_{T,x} + L_{T,x}p} \mathbb{B}_x(p), \quad (30)$$

где $R_{K,x}$, $L_{K,x}$ – эквивалентное сопротивление и индуктивность, соответственно, корпуса экрана (рис.4).

Итак, поле внутри экрана можно определить по формулам:

$$\begin{aligned} \mathbb{B}_{p,x}(p) &= \frac{R_{K,x}}{R_{K,x} + L_{K,x}p} \cdot \frac{R_{T,x}}{R_{T,x} + L_{T,x}p} \mathbb{B}_x(p); \\ \mathbb{B}_{p,y}(p) &= \frac{R_{K,y}}{R_{K,y} + L_{K,y}p} \cdot \frac{R_{T,y}}{R_{T,y} + L_{T,y}p} \mathbb{B}_y(p); \\ \mathbb{B}_{p,z}(p) &= \frac{R_{K,z}}{R_{K,z} + L_{K,z}p} \cdot \frac{R_{T,z}}{R_{T,z} + L_{T,z}p} \mathbb{B}_z(p). \end{aligned} \quad (31)$$

Индуктивность экрана можно найти из формул, приведённых в [4]. Активные сопротивления экрана можно найти, представив элементы конструкции последнего в виде металлических колец (рис. 3) с учётом скин-эффекта. Если принять коэффициент затухания комплексной частоты p равным нулю, то получим спектральную плотность электрического поля. В некоторых

случаях для анализа можно использовать именно её, но если необходима временная зависимость, то выражения (31) необходимо подвергнуть обратному преобразованию Лапласа.

Одна из часто встречающихся конструкций БА КА – блочная конструкция (рис. 5). При анализе таких конструкций выражения (19) и (31) не будут справедливы и ими пользоваться нельзя. Необходимо рассматривать воздействие каждой составляющей полей отдельно. Так, например, при расчёте составляющей $B_{p,z}(t)$ во внутренней полости корпуса, представленного на рис.5, а необходимо учитывать влияние всех торцевых граней и корпусов. Примерно такая же картина будет при определении составляющей $B_{p,x}(t)$ во внутренней полости корпуса, представленного на рис. 5, б.

С целью определения адекватности предложенного метода был проведён эксперимент по определению магнитного поля внутри однородных экранов. Эксперимент был проведён по методике, предложенной в [2]. Лабораторный генератор создавал одиночный импульс магнитного поля, описываемый выражением

$$H(t) = 258(e^{-9,075 \cdot 10^4 t} - e^{-9,739 \cdot 10^6 t}), \text{ А/м.} \quad (32)$$

Измерения проводились индукционным датчиком с последующим неполным интегрированием [2]. Выражение (32) – это составляющая поля, параллельная оси соленоидальной катушки индукционного датчика в месте его установки без экрана.

Затем датчик помещался в экран и проводились измерения магнитного поля внутри трёх экранов (1,2 и 3). Экраны 1 и 2 были изготовлены из сплава АмГ 6 и представляли собой цилиндры диаметром 10 см и длиной 25 см. Толщина стенок экрана 1 была равна 0,4 мм. Толщина стенок экрана 2 была равна 2,5 мм. Экран 3 был изготовлен из сплава 30ХГСА и представлял собой форму параллелепипеда с длиной рёбер $b_1=15$ см, $b_2=3$ см, $b_3=5$ см. Толщина стенок экрана 1 была равна 0,1 мм.

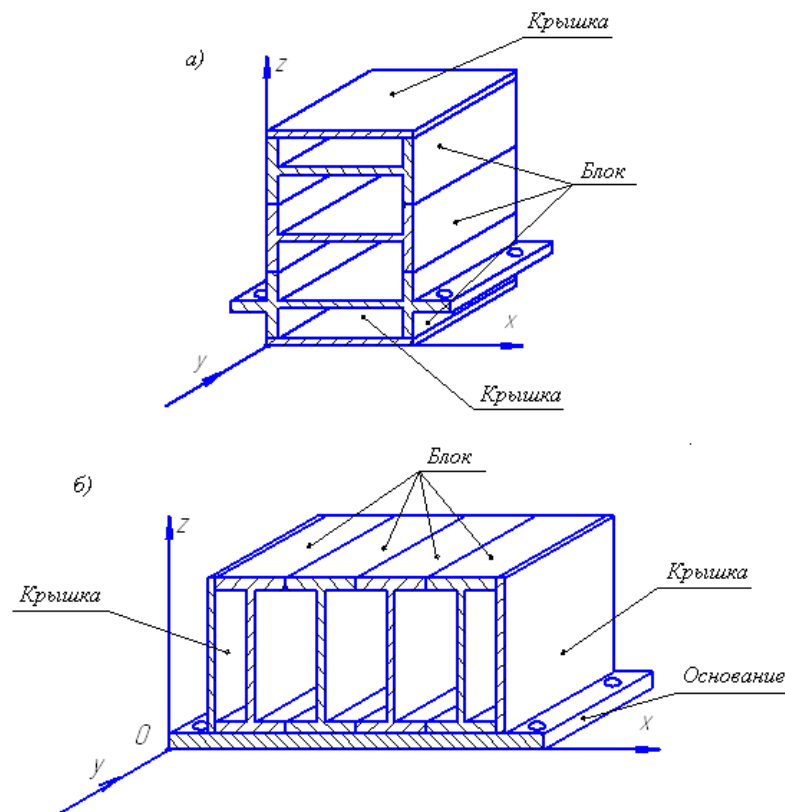


Рис. 5. Блочные конструкции БА КА

Таблица 1. Расчётные и экспериментальные данные

№ Экрана	$u(t_{m1}),$ мВ		$\tau_{\phi 1},$ мкс		$\tau_{\Pi 1},$ мкс		$t_0,$ мкс		$\tau_{\phi 2},$ мкс		$\tau_{\Pi 2},$ мкс	
	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.
1	510	660	20	21	50	49	81	79	40	41	257	190
2	59	47	30,3	30,6	75	81	131	145	185	170	756	610
3	47	54	40	60	141	144	280	250	190	115	860	690

В табл. 1 представлены результаты расчёта и эксперимента.

Форма импульса на выходе датчика приведена на рис. 6. Расчётные значения получены в два этапа. Сначала рассчитывалось поле внутри экрана, затем – сигнал на выходе датчика. Расчёт по второму этапу проводился по методике, приведённой в [2].

Приведённые в табл. 1 расчётные и экспериментальные значения параметров выходного импульса индукционного датчика показывают достаточно высокую сходимость. Благодаря этому можно сделать вывод, что предложенная в настоящей статье методика расчёта электромагнитного поля внутри однородных экранов в условиях воздействия ЭСР вполне адекватна.

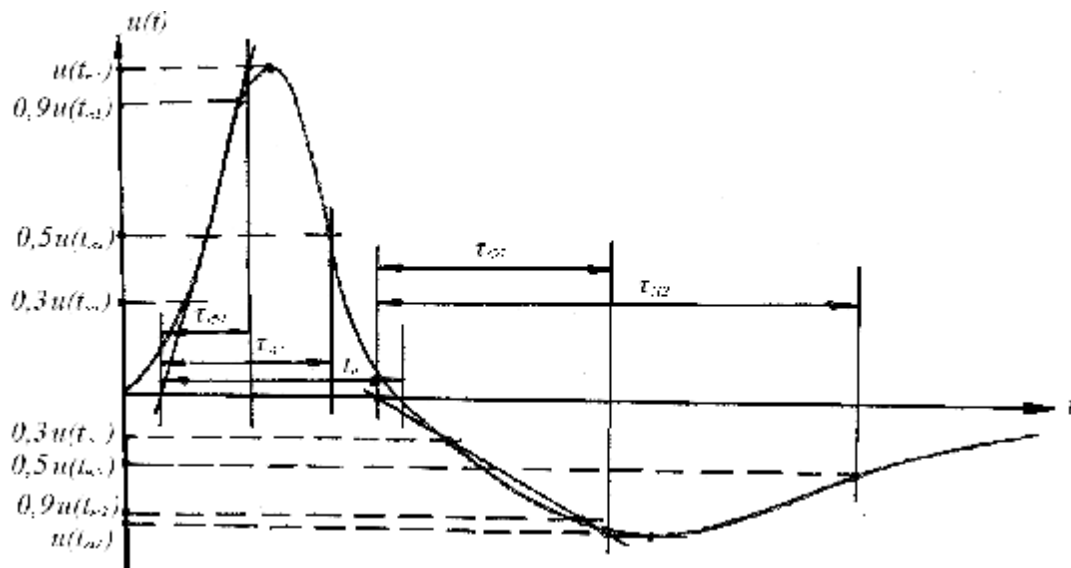


Рис. 6. Форма импульса на выходе датчика

Библиографический список

1. NASA-HDBK-4002A. Mitigating in-space charging effects. Guideline. National Aeronautics and Space Administration, 2011.-181 p.
2. Кокшаров, А.М. Импульсные электромагнитные поля внутри неоднородных экранов [Текст]/А.М. Кокшаров.- М.: ВА РВСН им. Петра Великого, 1998.- 312 с.
3. Костин, А.В. Анализ методов защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов от воздействия

факторов электростатического разряда [Текст]/А.В. Костин//Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2011.- №7(31). – С. 107-112.

4. Калантаров, П.Р., Расчёт индуктивностей [Текст]/ П.Р. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Справочная книга 3-е. изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленигр. отд: 1986. - 488 с.
5. Яворский, Б.Ф., Справочник по физике [Текст]/ Б.Ф. Яворский, А.А. Детлаф – М.: Наука, 1964. – 512 с.

CALCULATION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD IN HOMOGENEOUS HULL OF ON BOARD EQUIPMENT OF SPACE VEHICLE UNDER INFLUENCE OF ELECTROSTATIC DISCHARGES

© 2012 A.V. Kostin

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

The method of calculation of the electric and magnetic fields in homogeneous shields for calculations electromagnetic interference inside the hull of on board equipment of space vehicle under influence of electrostatic discharges. Experimental results confirming the adequacy of the proposed method.

Onboard equipment, the space vehicle, electrostatic discharge, electric field, magnetic field, magnetic flow, current, EMF.

Информация об авторе

Костин Алексей Владимирович, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: xpehbam27@yandex.ru. Область научных интересов: повышение устойчивости бортовой аппаратуры космических аппаратов к внешним воздействующим факторам.

Kostin Aleksey Vladimirovich, post-graduate student of the design and manufacture of electronic equipment department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: xpehbam27@yandex.ru. Area of scientific: increase of stability of onboard equipment of space vehicles to external influencing factors.

УДК 621.382+535.42

ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР НА АЛМАЗНОЙ ПЛЕНКЕ©2012 К. Н. Тукмаков¹, Б. О. Володкин¹, В. С. Павельев¹, М. С. Комленок²,
А. А. Хомич²¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)²Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН

Алмаз с внедренными центрами окраски является перспективным материалом для реализации квантовых механизмов хранения информации из-за возможности создания квантовых битов и вспомогательной архитектуры (волноводов) в одной плоскости. В данной работе представлен метод создания фотонно-кристаллического резонатора в алмазной мембране с использованием технологии фокусированных ионных пучков (ФИП). Представлен спектр люминесценции полученного резонатора.

Фотонный кристалл, центры окраски, резонатор, люминесценция, фокусированный ионный пучок.

Введение

Разработка твердотельных квантовых оптических устройств является актуальной задачей для фундаментального изучения взаимодействия света с веществом, а также для прикладных задач квантовой информатики. Алмаз и его модификации с центрами окраски являются перспективными материалами для создания интегральных квантовых устройств, например, ярких однофотонных излучателей и квантовых битов на основе спиновых систем [1, 2]. Для контроля эмиссии фотонов и соединения между собой отдельных квантовых битов необходимы технологии создания в объеме алмаза микро- и наноканалов. Разработка и оптимизация таких технологий является актуальной на сегодняшний день задачей. В данной работе описан процесс создания элементов алмазной интегральной фотоники на примере фотонно-кристаллического резонатора в алмазной мембране. Создание резонатора осуществлялось с помощью технологии фокусированных ионных пучков (ФИП). В работе проведена оптимизация режима записи топологии резонатора в алмазной мембране.

1. Создание фотонно-кристаллического резонатора

На рис. 1 схематично изображен фотонно-кристаллический резонатор, который представляет собой массив отверстий диаметром 140 нм в мембране толщиной 300 нм, расположенных в гексагональном порядке с периодом 275 нм со специальными дефектами структуры в центральной области, так называемая М7 топология [1].

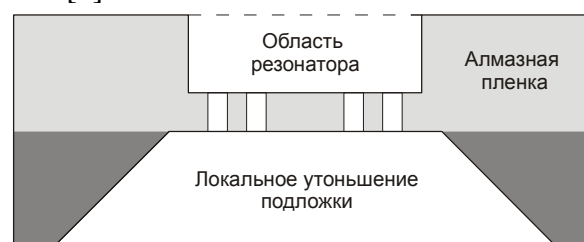


Рис. 1. Схематическое изображение резонатора

Для получения в алмазной пленке набора отверстий нужной конфигурации был использован метод прямой записи фокусированным ионным пучком. В работе использовалась ионная пушка с жидкометаллическим галлиевым источником (Ga+) с ускоряющим напряжением 30 кВ (на основе платформы «Нанофаб-100» производства НТ-МДТ, Россия).

В качестве основы резонатора была использована пленка нанокристаллического алмаза толщиной 2 мкм, выращенная методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) на кремниевой подложке, способ получения подробно представлен в работе [3, 4]. После получения пленки было произведено локальное удаление подложки под пленкой химическим травлением, в результате чего была получена алмазная мембрана толщиной 2 мкм и площадью примерно 2 мм².

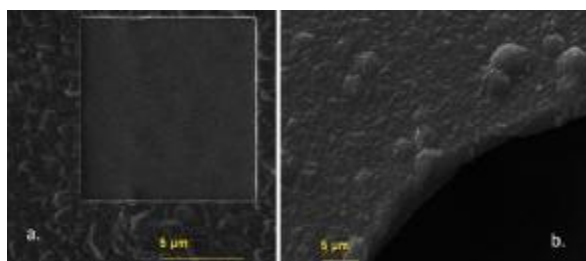


Рис. 2. РЭМ изображения поверхности алмазной мембраны: а) область с локальным утоньшением до 300 нм б) скол мембраны под углом

На рис. 2 показана часть алмазной мембраны с выполненным локальным утоньшением в области 7x5 мкм. Выполнение такого утоньшения требуется для достижения необходимой толщины (300 нм) мембраны при создании планарных структур. Утоньшение производилось с использованием технологии ФИП при токе ионного пучка 120 нА, что также обеспечило значительное уменьшение шероховатости поверхности алмазной пленки.

Для получения сквозных отверстий заданного диаметра в мембранах указанной толщины был подобран оптимальный рабочий ток (35 нА). Вследствие того, что при выбранном рабочем токе для алмаза характерен высокий уровень переосаждения удаленного ионным пучком материала [5], был использован метод последовательной многократной записи одной структуры с целью уменьшения времени однократной экспозиции пикселя. При этом время однократной экспозиции было неизменно и составляло 1 мс с 400-кратным повторением записи одной точки.

Глубина травления задавалась количеством циклов записи всей топологии структуры резонатора, которое достигало 20. На рис. 3 приведено РЭМ изображение, выполненное под углом 47°, которое показывает, что подобранный ток и время экспозиции одной точки обеспечивают получение сквозных отверстий в мембране (вырезание части мембраны выполнено после травления отверстий с использованием ФИП). На рис. 4 приведено РЭМ изображение одного из изготовленных резонаторов.

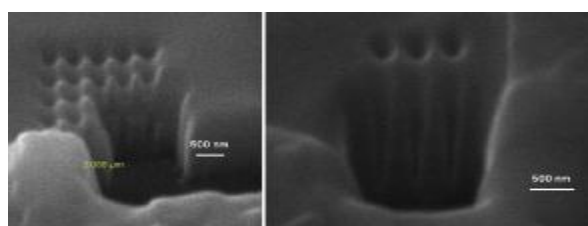


Рис. 3. РЭМ изображение сквозных каналов в алмазной мембране

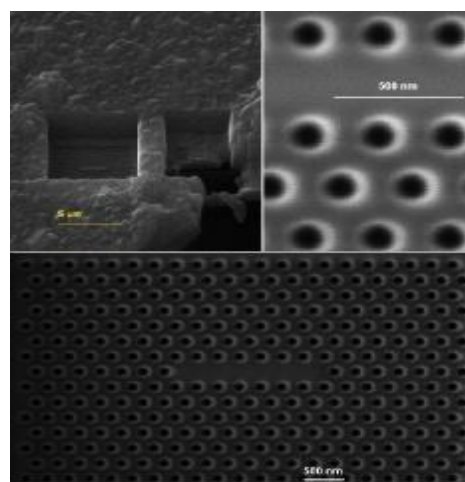


Рис. 4. РЭМ изображение фотонно-кристаллического резонатора

2. Измерение спектров фотолюминесценции

Для определения оптических свойств изготовленных фотонно-кристаллических резонаторов были проведены измерения спектров фотолюминесценции, представленные на рис. 5. Измерения проводились с использованием рамановского спектрометра Horiba Jobin Yvon HR 800 и лазера с длиной волны

488 нм. На рис. 5 представлены спектры фотолюминесценции исходной пленки и фотонно-кристаллического резонатора. На спектре исходной пленки нанокристаллического алмаза присутствуют пик алмаза (521 нм) и полоса аморфного углерода (526 нм). Для созданной с помощью ФИП-технологии структуры виден характерный пик, хорошо согласующийся с теоретическим значением резонанса полученного

фотонно-кристаллического резонатора. Также на спектре резонатора присутствует пик на длине волны 504,5 нм, связанный с 3Н центрами, возникшими в результате воздействия ионного пучка на алмазную пленку. 3Н центры являются радиационным дефектом, возникающим во всех типах алмазов после облучения [5-7].

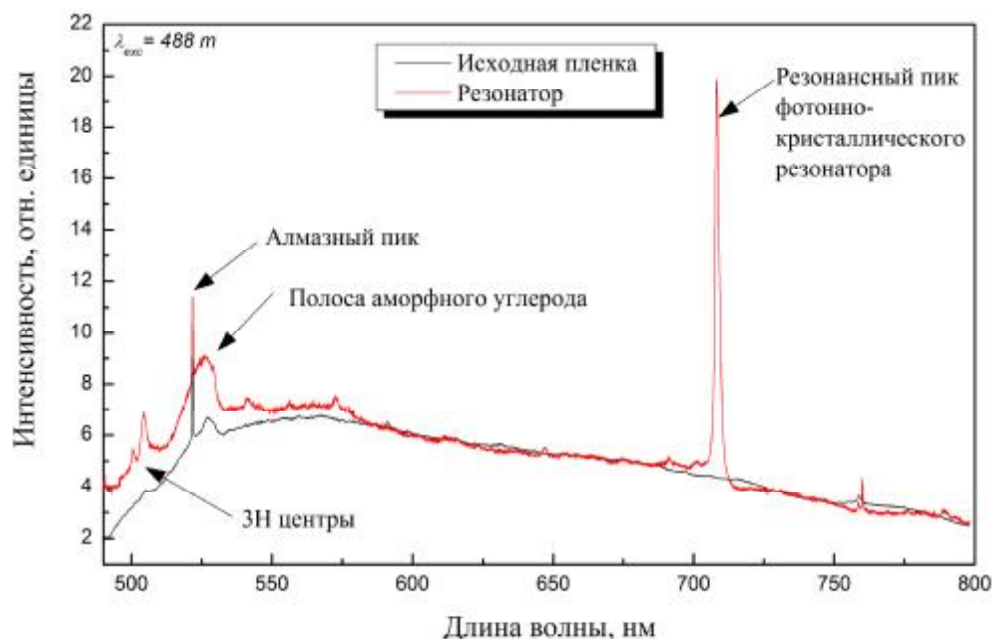


Рис. 5. Спектры фотолюминесценции фотонно-кристаллического резонатора и исходной пленки

Заключение

Показана возможность получения с помощью технологии фокусированных ионных пучков фотонно-кристаллических резонаторов в объеме алмаза с требуемым положением резонансного пика фотолюминесценции. Структуры такого типа могут быть использованы для создания устройств интегральной оптики видимого диапазона.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 11-02-90730-моб_ст и 11-02-90728-моб_ст. Алмазная мембрана предоставлена В.Г. Ральченко (Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН).

Библиографический список

1. Riedrich-Möller, J. One- and two-dimensional photonic crystal microcavities in

single crystal diamond [Text]/ J. Riedrich-Möller // Nature nanotechnology. - 2012, T. 7. - № 1. - С. 69-74.

2. Bayn, I. Processing of photonic crystal nanocavity for quantum information in diamond [Text]/ I. Bayn // Diamond and Related. - 2011. - С. 1-25.

3. Basov, A. A. Spatial localization of Si-vacancy photoluminescent centers in a thin CVD nanodiamond film. [Text]/ A. A. Basov // Phys. Stat. Sol. (a). - 2009. - Т. 206. - № 9. - С. 2009-2011.

4. Gruen, D. M. Nanocrystalline diamond films [Text]/ D. M. Gruen // Annual Review of Materials Science. - 1999. - Т. 29. - С. 211-259.

5. Tarutani, M. Application of the focused-ion-beam technique for preparing the cross-sectional sample of chemical vapor deposition diamond thin film for high-

resolution transmission electron microscope observation [Text]/ M. Tarutani, Y. Takai, R. Shimizu // Japanese journal of applied physics. - Т. 31. - № 9А. – С. 1305-1308.

6. Vlasov, I. I. Experimental evidence for charge state of 3H defect in diamond

[Text]/ I. I. Vlasov // Phys. Stat. Sol. (a). - 2003. - Т. 199. - С. 103-107.

7. Walker, J. Optical absorption and luminescence in diamond [Text]/ J. Walker // Rep. Prog. Phys. - 1979. - Т. 42. - № 10. С. 1605

DIAMOND FILM BASED PHOTONIC CRYSTAL RESONATOR

K. N. Tukmakov¹, B. O. Volodkin¹, V. S. Pavelyev¹, M. S. Komlenok², A. A. Khomich²

¹Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University), Samara, Russia

²A. M. Prokhorov General Physics Institute, Moscow, Russia

Diamond with embedded color centers is a promising material for realization of quantum information storage mechanisms due to the possibility of creating quantum bits and auxiliary architectures (fibers) in the same plane. This paper presents a method of creating a photonic crystal cavity in the diamond membrane using focused ion beams. The luminescence spectrum of the resonator is shown.

Photonic crystal, color centers, resonator, luminescence, focused ion beam.

Информация об авторах

Тукмаков Константин Николаевич, инженер кафедры нанотехнологий, Самарский государственный аэрокосмический университет имени С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: tukmakov.k@gmail.com. Область научных интересов: производство микро- и наноструктур, технология фокусированных ионных пучков.

Володкин Борис Олегович, инженер кафедры нанотехнологий, Самарский государственный аэрокосмический университет имени С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: boris-volodkin@yandex.ru. Область научных интересов: производство микро- и наноструктур, сканирующая зондовая микроскопия.

Павельев Владимир Сергеевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой нанотехнологий Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: pavelyev@smr.ru. Область научных интересов: дифракционная микрооптика и оптические волноводы, нанопластика и синтез оптических метаматериалов, технологии формирования микро- и наноструктур.

Комленок Максим Сергеевич, м.н.с. лаборатории лазерной оптики поверхности Центра естественно-научных исследований Учреждения Российской академии наук Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН. E-mail: komlenok@nsc.gpi.ru. Область научных интересов: оптика, лазерная физика, микро- и нано – структурирование.

Хомич Андрей Александрович, аспирант лаборатории алмазных материалов Центра естественно-научных исследований Учреждения Российской академии наук Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН. E-mail: antares-610@yandex.ru. Область научных интересов: оптика, углеродные материалы, спектроскопия.

Tukmakov Konstantin Nickolaevich, engineer of the department of nanoengineering, junior researcher REC Nanotechnology of Samara State Aerospace University named after S.

P. Korolyov (national research university). E-mail: tukmakov.k@gmail.com. Area of scientific: the production of micro-and nanostructure, technology focused ion beams.

Volodkin Boris Olegovich, engineer of the department of nanoengineering, junior researcher REC Nanotechnology of Samara State Aerospace University named after S. P. Korolyov (national research university). E-mail: boris-volodkin@yandex.ru. Area of scientific: the production of micro-and nanostructure, scanning probe microscopy.

Pavelyev Vladimir Sergeevich, doctor of physical and mathematical sciences; head of nanoengineering department of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (national research university). E-mail: pavelyev@smr.ru. Area of scientific: diffractive micro-optics and optical waveguides, nanophotonics, and synthesis of optical metamaterials, technology formation of micro- and nanostructures.

Komlenok Maxim Sergeevich, Junior Researcher of Surface Laser Optics Laboratory of Natural sciences center of Prokhorov general physics institute RAS. E-mail: komlenok@nsc.gpi.ru. Area of scientific: Optics, laser physics, micro and nano structuring.

Khomich Andrey Alexandrovich, post-graduate student, diamond materials laboratory of Natural sciences center of Prokhorov general physics institute RAS. E-mail: antares-610@yandex.ru. Area of scientific: optics, carbon materials, spectroscopy.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЛОПАТОК ТУРБОАГРЕГАТОВ, ОСНОВАННЫЕ НА НЕЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ПЕРВИЧНЫХ СИГНАЛОВ

© 2012 А. Ж. Чернявский¹, А. И. Данилин², С. А. Данилин²

¹ОАО «АВТОВАЗ», г. Тольятти

²Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В статье предложена новая реализация дискретно-фазового метода, позволяющая определить параметры колебаний лопаток турбомашин при помощи анализа искажений формы сигнала первичного преобразователя. Колебание лопаток приводит к искажению формы сигнала первичного преобразователя, анализ искаженного сигнала методами нелинейной аппроксимации позволяет определить параметры колебаний лопатки.

Турбоагрегат, диагностика, лопатка, колебания, дискретно-фазовый метод, нелинейная аппроксимация, искажения, первичный преобразователь.

Обеспечение высокой эксплуатационной надёжности газотурбинных двигателей (ГТД) и паровых турбин в условиях больших ресурсов является важной проблемой современного машиностроения. Наиболее дорогостоящими и ответственными деталями ГТД являются лопатки компрессора и турбины, работающие в сложных эксплуатационных условиях высоких динамических нагрузок, высоких температур, эрозионных и коррозионных воздействий.

Для нормальной эксплуатации ГТД и паровых турбин и предотвращения аварийных ситуаций необходимо контролировать состояние лопаток в процессе работы.

В настоящее время контроль состояния лопаток в эксплуатации проводится в основном на остановленной турбомашине эндоскопическими методами, требует профессионализма и ответственности технического персонала и является очень трудоемким. Так, по данным фирмы «Роллс-ройс», объем эндоскопической диагностики на авиационных ГТД доходит до 45...60 % от общего объема диагностических работ.

Несмотря на все принимаемые

меры, имеют место аварийные ситуации, связанные с поломкой лопаток, которые полностью выводят турбомашину из строя на длительное время. Например, по парку ГТД, эксплуатируемых на компрессорных станциях магистральных газопроводов, недоработка ресурса двигателей по причине поломки лопаток составляет от 10 до 20% по разным типам турбомашин.

Существуют различные методы и средства диагностики и контроля деформационного состояния лопаток на эксплуатируемых турбоагрегатах, например, описанные в [1]. Среди этих методов выделяется бесконтактный дискретно-фазовый метод (ДФМ), позволяющий определять индивидуальное деформационное состояние каждой лопатки рабочего колеса турбомшины. Дальнейшим практическим развитием ДФМ является система контроля деформационного состояния лопаток, предложенная авторами в [2].

В классических реализациях ДФМ определяются временные интервалы прохождения лопаток около одного или нескольких импульсных первичных преобразователей, на их основе вычисляются амплитуды колебаний лопаток и

смещения их торцов от исходного рабочего положения под воздействием статических и динамических нагрузок. Полученные значения амплитуды колебаний лопаток и смещения их торцов интерпретируются затем в области механических напряжений и деформаций.

Изменение указанных параметров является диагностическим признаком, отражающим эксплуатационное состояние лопаток.

Для целей диагностики и определения параметров колебаний лопаток могут применяться различные виды импульсных первичных преобразователей – индукционные, вихрековые, ёмкостные, оптоэлектронные, СВЧ и другие. Прохождение лопатки в зоне видимости первичного преобразователя вызывает генерацию сигнала соответствующей формы на выходе (рис. 1).

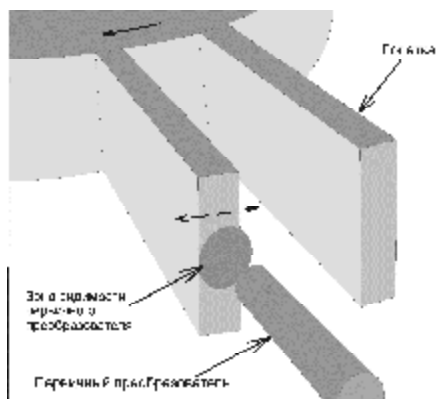


Рис. 1. Прохождение лопатки в зоне видимости первичного преобразователя

Колебательный характер движения лопатки и неравномерность мгновенной скорости лопатки приводят к искажению формы генерируемого импульса.

По степени искажений формы генерируемого импульса возможно определить параметры колебаний контролируемой лопатки.

Пусть, например, импульсный первичный преобразователь при прохождении лопатки генерирует импульс колоколообразной формы, который может

быть описан выражением для гауссова импульса:

$$s(y) = \exp\left(-\frac{y^2}{2a_y^2}\right), \quad (1)$$

где y – перемещение торца лопатки, a_y – параметр гауссова импульса.

Предположим, что лопатка колеблется по синусоидальному закону. Тогда перемещение торца лопатки будет иметь две составляющие, обусловленные его окружным и колебательным движением, и определится как:

$$y(t) = R w_{\kappa} t + A \sin(w_{\lambda} t + j), \quad (2)$$

где R – радиус колеса, w_{κ} – угловая частота вращения колеса, w_{λ} и j – угловые частота и начальная фаза колебаний лопатки.

В этом случае выходной сигнал при наличии колебаний определится как:

$$s(t) = \exp\left(-\frac{1}{2a_t^2} \cdot \left(t + \frac{A}{R w_{\kappa}} \sin(w_{\lambda} t + j)\right)^2\right). \quad (3)$$

При отсутствии колебаний:

$$s(t) = \exp\left(-\frac{1}{2a_t^2} \cdot t^2\right), \quad (4)$$

где $a_t = \frac{a_y}{R w_{\kappa}}$ – параметр гауссова импульса, имеющий размерность времени.

Форма выходных сигналов первичного преобразователя в обоих случаях показана на рис. 2.

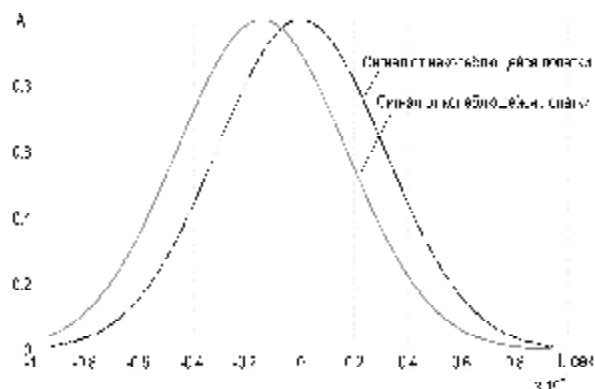


Рис. 2. Выходной сигнал первичного преобразователя

Для определения параметров колебаний лопатки авторами предложено использовать методы нелинейной аппроксимации, суть которых заключается в нахождении неизвестных параметров a_1, a_2, \dots, a_n аналитического выражения $f(x(t), a_1, a_2, \dots, a_n)$, удовлетворяющих заданному критерию оптимальности.

В качестве исходных данных для аппроксимации задаются отсчеты сигнала первичного преобразователя от колеблющейся лопатки $x(t)$. Необходимо обработать отсчеты сигнала таким образом, чтобы определить параметры колебательного движения и вместе с тем сгладить случайные отклонения, вызванные шумами и погрешностью измерений.

Обычно в качестве критериев оптимальности используются точностные критерии. Например, одним из эффективных критериев является метод наименьших квадратов, обеспечивающий минимум квадратичной погрешности аппроксимации [3].

Таким образом, аппроксимативная задача определения параметров модели может быть интерпретирована как задача оптимизации целевой функции.

Если имеется несколько функций, удовлетворяющих критерию оптимальности, то наилучшей будет функция, для которой квадратичная погрешность аппроксимации будет минимальной [3]:

$$\Delta = \sum_{i=1}^M [F_x(x_i) - f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)]^2 = \min, \quad (5)$$

где $F_x(x_i)$ - отсчеты сигнала первичного преобразователя, $f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)$ - аппроксимирующая функция, описывающая сигнал.

Так как Δ является функцией параметров a_1, a_2, \dots, a_n , то необходимым условием минимума дифференцируемой функции многих переменных является выполнение условий, определяемых системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta}{\partial a_1} = \sum_{i=1}^M [F_x(x_i) - f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)] \cdot \frac{\partial f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)}{\partial a_1} = 0; \\ \frac{\partial \Delta}{\partial a_2} = \sum_{i=1}^M [F_x(x_i) - f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)] \cdot \frac{\partial f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)}{\partial a_2} = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial \Delta}{\partial a_n} = \sum_{i=1}^M [F_x(x_i) - f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)] \cdot \frac{\partial f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)}{\partial a_n} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

после решения которой численными методами определяются искомые параметры a_1, a_2, \dots, a_n .

При аппроксимации значений сигнала тем или иным методом, при различном количестве отсчетов исходного сигнала и их различных абсолютных значениях возникает задача оценки точности приближения. В этом случае наиболее целесообразно определять относительные методические погрешности:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^M [F_x(x_i) - f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)]^2}{\sum_{i=1}^M F_x^2(x_i)}. \quad (7)$$

Таким образом, выражение (7) описывает целевую функцию оптимизации, связывающую относительную погрешность оптимизации d с искомыми параметрами a_1, a_2, \dots, a_n .

Существующие алгоритмы оптимизации в зависимости от необходимости нахождения производных целевой функции могут быть условно разделены на следующие классы:

- методы нулевого порядка (безградиентные методы), основанные только на вычислении значений целевой функции. К таким методам относится, например, метод деформируемых многогранников Нелдера – Мида [5]. Безградиентные методы более пригодны для задач, где минимизируемая функция является существенно нелинейной или имеет разрывы;

- методы первого порядка (градиентные методы), использующие значения первых производных целевой функции (якобиана целевой функции). Градиентные методы обычно эффективны в

случаях целевых функций, непрерывных вместе с первыми производными;

- методы второго порядка, в которых кроме первых производных целевой функции (якобиана или его оценки) используются вторые производные целевой функции (гессиан целевой функции или его оценка). Методы второго порядка применяются реже, поскольку требуют больших вычислительных затрат для расчета матриц вторых производных.

Кроме того, в зависимости от отсутствия или наличия ограничений на значения параметров, алгоритмы могут быть разделены на безусловные и условные (с ограничениями в виде неравенств и равенств).

Также иногда невозможно или очень трудно найти аналитическое выражение для производных целевой функции. Поэтому, при использовании градиентных методов, применяются процедуры конечно – разностной аппроксимации якобиана и гессиана целевой функции.

Для исследования поведения целевой функции в диапазоне допустимых значений параметров и, особенно, в окрестности предполагаемого минимума, были получены графические представления целевой функции. Поскольку исследуемая целевая функция является функцией трех параметров A , w_d , j , то графические представления целевой функции были построены в двух вариантах - в зависимости от частоты колебаний лопаток w_d и амплитуды A при фиксированном значении начальной фазы j и в зависимости от частоты колебаний лопаток w_d и начальной фазы j при фиксированном значении амплитуды A . Пример графического представления целевой функции d в координатах w_d и A представлен на рис. 3.

Анализ выполненных графических представлений целевой функции показал:

- существенную нелинейность целевой функции в области допустимых

значений параметров, отсутствие разрывов целевой функции и ее дифференцируемость;

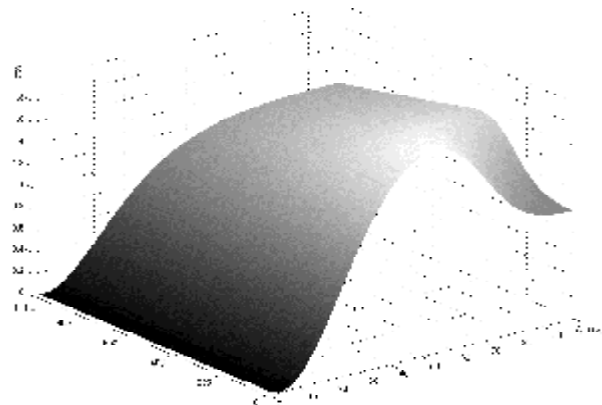


Рис. 3. Графическое представление целевой функции

- скорость сходимости целевой функции может быть оценена по скорости снижения рельефа в графическом представлении;

- удовлетворительную сходимость целевой функции по параметрам A и j и более худшую сходимость целевой функции по параметру w_d ;

- ухудшение соотношения сигнал/шум исходного сигнала из-за малой скорости схождения целевой функции по частоте резко снижает точность определения минимума целевой функции, точка минимума значительно смещается от своего положения при больших соотношениях сигнал/шум.

Последующие проходы алгоритма оптимизации показали существенно меньшие значения первой частной производной целевой функции по частоте колебаний лопаток w_d в сравнении с частными производными по амплитуде A и начальной фазе j . Также этот факт подтверждается выполненными расчетами градиента целевой функции.

Кроме этого, знание вида графического представления целевой функции позволяет выбирать точку начального приближения для запуска процесса оптимизации.

Для оценки реализуемости предложенного авторами метода определения параметров колебаний лопаток был выполнен ряд расчетов с применением различных методов оптимизации:

- безусловный метод деформируемых многогранников Нелдера-Мида (метод 1 в табл. 1);

- безусловный метод доверительных областей Ньютона (метод 2);

- условный метод доверительных областей Ньютона с отражениями (метод 3).

Для всех методов задавались одинаковые начальные условия, кроме того, для условного метода доверительных областей задавался допустимый диапазон значений параметров.

На рис. 4 показаны отсчеты выходного сигнала первичного преобразователя и сигнал, параметры которого определены в результате нелинейных аппроксимаций.

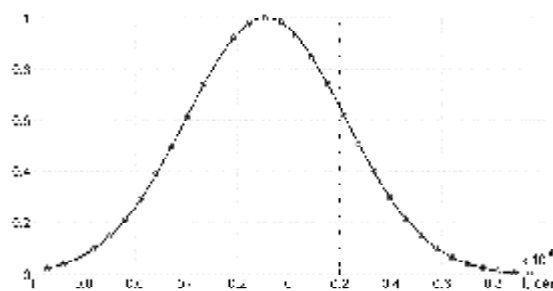


Рис. 4. Отсчеты выходного сигнала первичного преобразователя и сигнал, восстановленный по итогам аппроксимаций

Итоговые результаты для нескольких случаев оптимизаций с использованием указанных методов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Итоговые результаты оптимизаций

№	Кол-во точек	Параметры исходного сигнала				Результат аппроксимации		
		Нвр, об/мин	А, мм	Фл, Гц	phi, рад	А, мм	Фл, Гц	phi, рад
1	200	8200 С/ш= 100 000	0,5	100	pi/4	0,5003	98.54	0.785
						0,5995	72.07	0.631
						0,5614	80.00	0.681
2	200	8200 С/ш= 100 000	4,0	100	pi/4	4,00	99.28	0.783
						4,40	83.44	0.695
						4,50	80.16	0.676
3	200	8200 С/ш= 10 000	4,0	100	pi/4	4,00	99.09	0.790
						4,40	83.93	0.707
						4,50	80.04	0.683
4	200	8200 С/ш= 1000	4,0	100	pi/4	134,70	1.77	0.021
						4,10	81.16	0.769
						4,10	80.02	0.761
5	200	8200 С/ш= 500	4,0	100	pi/4	3,10	136.81	1.141
						3,60	80.90	0.906
						3,60	80.17	0.901

Таблица 1. Окончание

№	Кол-во точек	Кол-во итераций	Значение целевой функции	Метод
1	200	56420	1.2015e-10	1
		34	1.2738e-10	2
		44	1.2403e-10	3
2	200	23553	1.1341e-10	1
		35	2.9780e-10	2
		37	3.7267e-10	3
3	200	24265	1.3871e-08	1
		35	1.4041e-08	2
		37	1.4128e-08	3
4	200	192	1.2807e-06	1
		38	1.2813e-06	2
		38	1.2813e-06	3
5	200	17552	4.1643e-06	1
		45	4.1676e-06	2
		57	4.1677e-06	3

Таким образом, выполненные для различных значений параметров исходного сигнала оптимизации позволяют сделать следующие выводы:

- принципиальную возможность определения параметров колебаний лопаток предложенным методом;

- применение в качестве целевой функции относительной среднеквадратической погрешности дает возможность сравнивать между собой результаты различных аппроксимаций, с различными амплитудами, различным количеством точек и т.п.;

- градиентные методы оптимизации показывают высокую скорость сходимости, вместе с тем вопрос выбора наиболее оптимального метода требует дальнейшего изучения;

- ухудшение соотношения сигнал/шум ведет к снижению точности определения параметров, вплоть до невозможности определения.

Выводы

Анализируемый сигнал формируется в результате взаимодействия торца лопатки, перемещающегося сложным образом в зоне чувствительности первич-

ного преобразователя, с его электромагнитным полем. При этом колебательная составляющая сложного движения торца лопатки приводит к искажению формы сигнала.

Параметры колебаний торца лопатки – амплитуда, частота и начальная фаза – могут быть непосредственно определены в результате анализа изменений формы сигнала первичного преобразователя, при использовании методов нелинейной аппроксимации.

Библиографический список

1. Заблоцкий, И.Е. Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин [Текст]/ И.Е. Заблоцкий, Ю.А. Коростелев, Р.А. Шипов. – М.: Машиностроение, 1977. - 160 с.

2. Данилин, А.И. Диагностика и контроль деформационного состояния лопаток турбоагрегатов [Текст]/ А.И. Данилин, А.Ж. Чернявский// Контроль. Диагностика. – 2003. – №1. – С.23-28.

3. Прохоров, С.А. Аппроксимативный анализ случайных процессов [Текст]/ С.А. Прохоров, 2-е изд., перераб. и доп./ Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2001. - 380 с.

PARAMETERS TRANSDUCERS OF THE BLADE'S DYNAMIC MOVEMENTS OF TURBOUNITS BASED ON NONLINEAR APPROXIMATION OF PRIMARY SIGNALS

© 2012 A. Zh. Chernyavskiy¹, A. I. Danilin², S. A. Danilin²

¹AvtoVAZ, Tolyatti, Russia

²Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University), Samara, Russia

New method for the determination of blades oscillation parameters is proposed. The approach is based on the analysis of primary transducers signals distortions using nonlinear approximation techniques. Blades oscillations lead to distortions of primary transducer output signal, non-linear approximation techniques allow to determine blade oscillation parameters.

Turbo-unit, diagnostics, blade, oscillations, discrete-phase method, non-linear approximation, primary transducer.

Информация об авторах

Чернявский Аркадий Жоржевич, ведущий инженер управления главного механика, ОАО «АВТОВАЗ». E-mail: ark@vaz.ru. Область научных интересов: разработка методов и электронной аппаратуры для определения параметров эксплуатационного состояния лопаток турбоагрегатов.

Данилин Александр Иванович, доктор технических наук, доцент кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: aidan@ssau.ru. Область научных интересов: разработка методов и электронной аппаратуры для определения параметров эксплуатационного состояния лопаток турбоагрегатов.

Данилин Сергей Александрович, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва. Область научных интересов: преобразователи линейных и угловых перемещений элементов вращающихся узлов изделий машиностроения.

Chernyavskiy Arkadiy Zhorzhevich, leading engineer, Joint-stock company AVTOVAZ. E-mail ark@vaz.ru. Area of research: developing methods and designing electronic equipment for determination of parameters of turbine-units blade's operating condition.

Danilin Alexander Ivanovich, doctor of technical sciences, associate professor at chair of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (national research university). E-mail: aidan@ssau.ru. Area of research: developing methods and designing electronic equipment for determination of parameters of turbine-units blade's operating condition.

Danilin Sergey Alexandrovich, student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (national research university). Area of research: primary transducers of linear and angular movements of rotating units in machine building.

УДК 531.7

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРЕ

© 2012 А. В. Солнцева, Б. В. Скворцов, С. А. Борминский

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

Рассматриваются два метода повышения точности измерения массы жидкости в резервуарах, основанные на нелинейной интерполяции экспериментальных калибровочных данных. Первый метод заключается в нахождении функции преобразования массы и совокупности измеряемых при мониторинге параметров жидкости при помощи калибровочной модели процесса измерения. Второй метод основан на определении индивидуальной аналитической зависимости для резервуара, связывающей массу жидкости с ее качественными и количественными параметрами.

Масса жидкости, резервуар, повышение точности, калибровка, нефтепродукт, интерполяция данных.

Важной задачей при эксплуатации и разработке авиационных и космических комплексов является измерение и контроль массы топлива в заправочных емкостях летательных аппаратов. Также одной из главных задач современного нефтегазового комплекса, включающего в себя группы отраслей по добыче, транспортировке и переработке нефти и газа и распределению продуктов их переработки, является определение остаточной массы жидкого товарного продукта, находящегося в резервуаре. Представленные на данный момент на рынке системы позволяют с помощью датчиков определять уровень, температуру, плотность жидкости, уровень подтоварной жидкости, количество закачанной и израсходованной жидкости, а масса или объем оставшегося продукта определяется устройством обработки как разность между текущими показаниями уровнемеров или входного и расходного расходомеров с учетом перечисленных параметров. Главным недостатком подобных систем является низкая точность учета продукта, связанная с тем, что вычисление остаточной массы жидкости в резервуаре производится по алгоритмам, не в полной мере учитывающим взаимосвязи указанных параметров с конечным результатом. Решением возникшей проблемы повышения точности является определение функции преобразования, учитывающей изменение величины остаточной массы продукта

при изменяющихся внешних и внутренних условиях.

На рис. 1 схематично представлен резервуар 1, заполненный контролируемой жидкостью 2 на уровне H . В резервуар опускается измерительный зонд 3, в частном случае труба, с отверстиями для размещения датчиков 4. Размещение датчиков 4 на разных уровнях, определяемых координатой y ($0 < y < H$), внутри резервуара 1 позволяет получить значение градиента параметров, таких, как температура T , давление p , плотность ρ , вязкость η и др.

Полученная с датчиков 4 информация о параметрах контролируемой жидкости поступает на устройство сбора информации 5, затем через блок передачи данных 6 в устройство обработки данных 7.

В общем случае масса продукта M контролируемой жидкости связана с косвенными измеряемыми параметрами обобщенной функциональной зависимостью

$$M = F(q_1, \dots, q_k, \dots, q_n), \quad (1)$$

где q_k – совокупность параметров, измеряемых при мониторинге, например, уровень контролируемой и подтоварной жидкостей, их плотность, вязкость, температура, градиент температур по глубине, диэлектрическая проницаемость, оптическое поглощение и другие, которые можно оперативно измерить известной датчиковой аппаратурой.

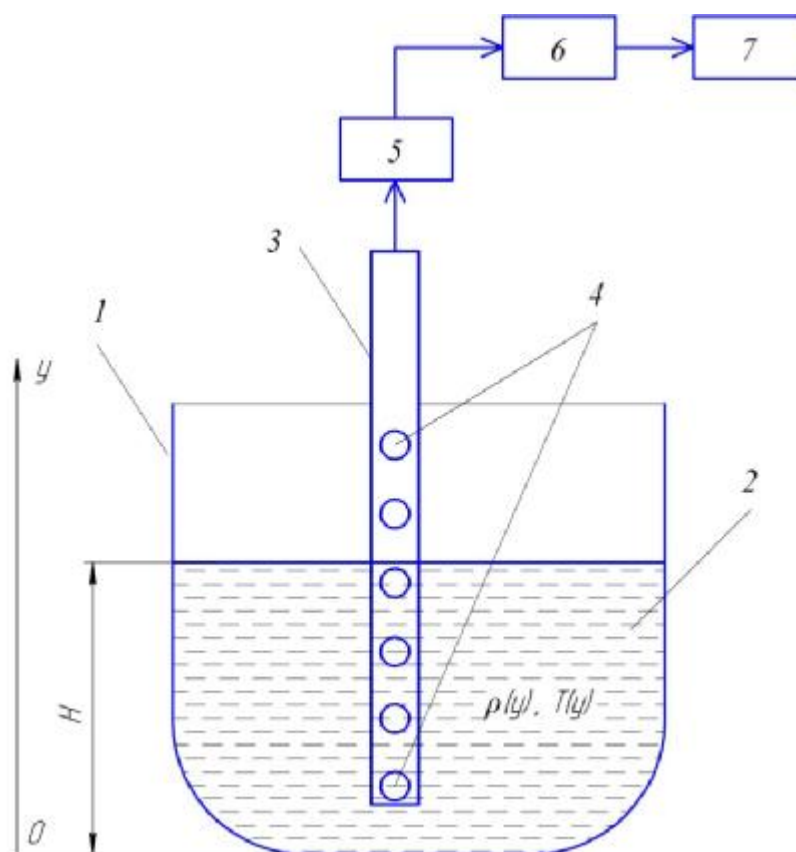


Рис. 1. Резервуар с контролируемой жидкостью: 1 – резервуар; 2 – контролируемая жидкость, параметры которой изменяются в зависимости от глубины налива; 3 – измерительный зонд; 4 – датчики; 5 – устройство сбора данных; 6 – блок передачи данных; 7 – устройство обработки данных

В общем случае функция F неизвестна. Её поиск является важнейшей задачей математического описания измерительного процесса. Учитывая, что любой измерительный процесс по определению подразумевает в себе, кроме сбора и обработки информации, также операцию калибровки по эталонам, для решения поставленной задачи предложен алгоритм измерений, показанный на рис. 2. Сущность алгоритма состоит в том, что для нахождения функции преобразования при неизвестной функции F составляется калибровочная модель процесса измерения. Для этого в резервуар i раз поэтапно наливают количество жидкости известной массы M_i , измеряют соответствующую ей совокупность контролируемых физико-химических параметров $q_{k,i}$, k – соответствует номеру измеряемого параметра ($k=1\dots m$), i – номеру калиб-

ровочного замера ($i=1\dots n$), значения которых запоминаются в центральном устройстве обработки. Количество эталонных замеров n должно быть не меньше числа контролируемых параметров m , то есть $n \geq m$ [1].

Пусть имеется n калибровочных наливов жидкости с известными значениями массы $M_1, \dots, M_i, \dots, M_n$. При этом следует помнить, что $M_i = M_{i-1} + \Delta M$, где ΔM – фиксированное приращение массы на каждом этапе калибровки. При каждом наливке контролируется совокупность параметров мониторинга резервуара $q_{k,i}$. Отметим, что при каждом очередном наливке физико-химические параметры жидкости будут меняться, так как процесс налива при больших объемах резервуара длительный, то будет меняться температура T , соответственно плотность ρ и вязкость η основного и подтоварного продукта.

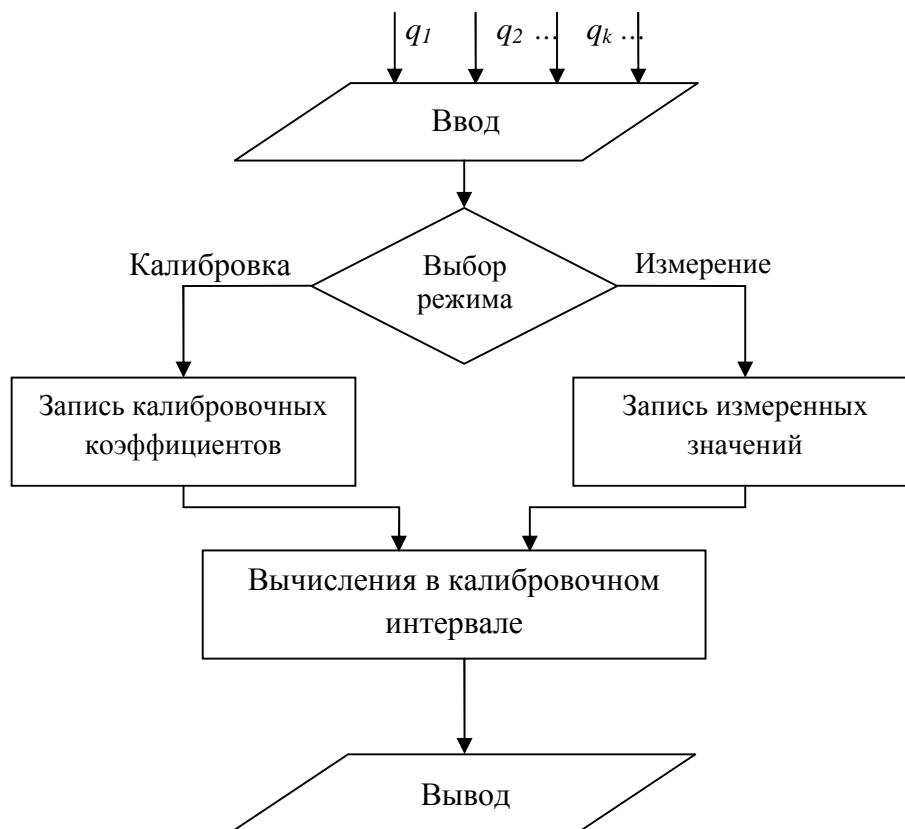


Рис. 2. Алгоритм измерений

При построении калибровочной модели для произвольных значений измеряемых параметров всегда можно подобрать такие нормирующие коэффициенты b_k , что будут выполняться равенства:

$$\begin{aligned}
 M_1 &= b_1 q_{1,1} + \dots + b_k q_{k,1} + \dots + b_m q_{m,1} = \sum_{k=1}^m b_k q_{k,1}; \\
 \dots & \\
 M_i &= b_1 q_{1,i} + \dots + b_k q_{k,i} + \dots + b_m q_{m,i} = \sum_{k=1}^m b_k q_{k,i}; \quad (2) \\
 \dots & \\
 M_m &= b_1 q_{1,m} + \dots + b_k q_{k,m} + \dots + b_m q_{m,m} = \sum_{k=1}^m b_k q_{k,m}; \\
 \dots & \\
 M_n &= b_1 q_{1,n} + \dots + b_k q_{k,n} + \dots + b_m q_{m,n} = \sum_{k=1}^m b_k q_{k,n}.
 \end{aligned}$$

Система (2) имеет n уравнений для m неизвестных b_k . Так как число эталонных замеров всегда можно сделать больше числа контролируемых параметров $n \geq m$, то из си-

стемы (2) всегда можно выбрать достаточное количество уравнений, из которых можно найти коэффициенты b_k . Желательно, чтобы выбранные для совместного решения уравнения охватывали возможно больший диапазон контролируемых параметров. Решение этой системы дает совокупность коэффициентов b_k , которые в средневзвешенной форме определяют искомый показатель качества. Система (2) имеет единственное решение, если главный определитель отличен от нуля. Решением этого уравнения являются соотношения:

$$b_k = \frac{Db_k}{D}, \quad (3)$$

где

$$D = \begin{vmatrix} q_{1,1} & \dots & q_{k,1} & \dots & q_{n,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{1,i} & \dots & q_{k,i} & \dots & q_{n,i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{1,n} & \dots & q_{k,n} & \dots & q_{n,n} \end{vmatrix}; \quad Db_k = \begin{vmatrix} q_{1,1} & \dots & M_1 & \dots & q_{n,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{1,i} & \dots & M_i & \dots & q_{n,i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{1,n} & \dots & M_n & \dots & q_{n,n} \end{vmatrix};$$

M_k – совокупность эталонных значений массы контролируемой жидкости, используемой при калибровке; $q_{k,i}$ – совокупность физико-химических параметров жидкости, измеренных при калибровке; k – соответствует номеру измеряемого параметра ($i=1\dots n$), i – номеру калибровочного замера ($k=1\dots n$).

Учитывая независимость получения измерительной информации и возможность варьирования сигналов датчиков, всегда можно исключить равенство нулю главного определителя в заданном диапазоне измерения.

Вычисленные таким образом коэффициенты b_k , согласно показанному на рис. 2 алгоритму, запоминаются в устройстве обработки и используются в дальнейшем в процедуре измерения. В процессе определения массы контролируемой жидкости измеряются параметры мониторинга $q_{k,X}$, а неизвестная масса нефтепродукта определяется по формуле:

$$M_X = b_1 q_{1,X} + \dots + b_k q_{k,X} + \dots + b_m q_{m,X} = \sum_{k=1}^m b_k q_{k,X}, \quad (4)$$

где M_X – искомое значение массы контролируемой жидкости; $q_{k,X}$ – совокупность измеренных параметров контролируемой жидкости.

Возможность применения формулы (4) обусловлена системой (2). Выражение (4) составляет в общем виде математическую модель измерительного процесса определения массы товарной жидкости по калибровочной модели и является конкретной формой реализации обобщенной функции преобразования (1).

Численный эксперимент показывает, что при любых значениях $min < q_{k,i} < max$ искомое значение находится в интервале $M_{min} < M_X < M_{max}$, что полностью подпадает под определение измерительного процесса, как фактора уменьшения неопределенности. Методом численного эксперимента доказано, что при любом количестве калибровочных отсчетов, равных числу используемых для мониторинга резервуара параметров, искомый параметр будет находиться в интервале $M_{min} \div M_{max}$. Таким образом, предложенный

способ измерений не требует точного знания функции, связывающей искомую массу жидкости с измеряемыми косвенными параметрами. Он предполагает создание математической модели в процессе калибровки. Чем больше параметров мы измеряем и чем больше число калибровочных отсчетов, тем выше точность измерений. Одним из измеряемых параметров может и должна быть температура.

Для пояснения физического смысла предложенного способа проанализируем простейший случай, когда измеряется только два параметра – уровень H и плотность жидкости ρ . При этом считаем, что температура жидкости не изменяется и равна температуре жидкости, наливаемой при калибровочном отсчете, а подтоварная жидкость отсутствует. Очевидно, что в этом случае масса жидкости будет вычисляться по формуле:

$$M_X = S H_X r_X, \quad (5)$$

где S – площадь основания емкости.

При вычислении массы по данной методике, для рассматриваемого случая калибровку достаточно проводить по двум эталонным массам, полностью перекрывающим диапазон ожидаемых значений $M_{min} \div M_{max}$. В формуле (3) будем иметь: $M_1 = M_{min}$; $M_2 = M_{max}$; $q_{11}=H_1$; $q_{12}=H_2$; $q_{21}=\rho_1$; $q_{22}=\rho_2$. Тогда выражение (2) примет вид:

$$M_X = b_1 H_X + b_2 r_X, \quad (6)$$

где

$$b_1 = \frac{r_2 M_1 - r_1 M_2}{H_1 r_2 - H_2 r_1}; \quad b_2 = \frac{H_1 M_2 - H_2 M_1}{H_1 r_2 - H_2 r_1}. \quad (7)$$

Если плотность жидкости в процессе калибровки не изменялась, что вполне может соответствовать действительности, то есть $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, то выражения (7) и (6) примут вид:

$$b_1 = \frac{M_1 - M_2}{H_1 - H_2}, \quad b_2 = \frac{H_1 M_2 - H_2 M_1}{r(H_1 - H_2)}. \quad (8)$$

$$M_X = b_1 H_X + b_2 \rho_X = \frac{M_1 - M_2}{H_1 - H_2} H_X + \frac{H_1 M_2 - H_2 M_1}{r(H_1 - H_2)} \rho_X. \quad (9)$$

Для подтверждения правильности предложенного способа покажем, что при $\rho_X = \rho$ выражения (5) и (9) идентичны. Учи-

тывая, что $M_1 = rSH_1$, $M_2 = rSH_2$ и подставляя эти выражения в (9), получим (5).

Таким образом, доказано, что выражение (5) является частным случаем выражения (6), которое позволяет вычислять искомое значение массы при изменяющейся плотности и, очевидно, является более точным, чем подтверждается эффективность предложенного способа измерений.

Способ предусматривает возможности неограниченного нарастания точности измерений, связанной с увеличением числа контролируемых параметров. Например, если к контролю уровня и плотности в процессе калибровки и измерений добавить контроль температуры, то выражение (4) примет вид:

$$M_x = b_1 H_x + b_2 r_x + b_3 T_x, \quad (10)$$

где коэффициенты b_k определяются по формуле (3) с определителями

$$D = \begin{vmatrix} H_1 & r_1 & T_1 \\ H_2 & r_2 & T_2 \\ H_3 & r_3 & T_3 \end{vmatrix}; \quad Db_1 = \begin{vmatrix} M_1 & r_1 & T_1 \\ M_2 & r_2 & T_2 \\ M_3 & r_3 & T_3 \end{vmatrix};$$

$$Db_2 = \begin{vmatrix} H_1 & M_1 & T_1 \\ H_2 & M_2 & T_2 \\ H_3 & M_3 & T_3 \end{vmatrix}; \quad \Delta b_3 = \begin{vmatrix} H_1 & r_1 & M_1 \\ H_2 & r_2 & M_2 \\ H_3 & r_3 & M_3 \end{vmatrix}.$$

Нетрудно показать, что если температура постоянна и при измерениях такая же, как и при калибровке, то выражение (10) превращается в (6). Если температура и плотность постоянны и такие же, как и при калибровке, то выражение (10) превращается в (5), что еще раз подтверждает правильность предложенного способа измерений и возможность учета различных изменяющихся факторов при вычислении массы жидкости в резервуаре.

Аналогично в систему можно добавить учет уровня подтоварной жидкости с контролем ее температуры или учесть контроль температуры в различных точках по глубине и многие другие факторы, например, диэлектрическую проницаемость и проводимость жидкости и т.д. Важно, чтобы число калибровочных замеров было не меньше, чем число контролируемых параметров жидкости в резервуаре.

Также предлагается еще один метод определения массы жидкости, находящейся в

резервуаре.

Приведенная в формуле (5) площадь основания емкости S в реальных условиях эксплуатации не является постоянной величиной, а изменяется в зависимости от многих факторов, в том числе и от уровня наполнения [2]. Поскольку резервуар подвержен естественной деформации при его заполнении продуктом, при вычислении объема необходимо учитывать изменение площади основания S по всему участку измерения y , то есть от дна резервуара $y=0$ до максимального уровня наполнения $y=H$ (рис. 1).

Отметим также, что изменение температуры одновременно приводит к изменению и плотности, и объема жидкости, поэтому масса при изменении температуры не меняется.

Значение плотности продукта ρ также в реальных условиях не является постоянным на всей протяженности $y \in [0, H]$, поэтому справедливо выражение для определения массы:

$$M_x = \int_0^H r(y) \cdot S(y) dy. \quad (11)$$

Площадь основания резервуара и объем наполняемого продукта в общем случае математически связаны формулой:

$$V = \int_{\mp} S(y) dy, \quad (12)$$

где $S(y)$ – площадь горизонтального сечения тела с данной аппликацией y .

Согласно (12), выражение (11) переписывается следующим образом:

$$M_x = \int_{\uparrow} \rho(y) \cdot \frac{V(y)}{y} dy. \quad (13)$$

Для оперативного контроля емкостей, которые используются в технологических процессах, внутреннего учета нефтепродуктов и расчета внутри предприятия производится калибровка емкостей. При калибровке емкости проводится определение вместимости резервуара при пошаговом заполнении его жидкостью с одновременным фиксированием высоты уровня. Калибровка емкостей необходима для определения действительных значений метрологических характеристик резервуара.

	18-49шп ЛБ	18-49шп ПБ	49-88 шп. ЛБ	49-88 шп. Пр.Б	88-127 шп. ЛБ	88-127 шп. Пр.Б	127-165 шп. ЛБ	127-165 шп. Пр.Б
Уровень	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,01	0,19	0,19	0,71	0,71	0,74	0,74	0,7	0,7
0,02	0,38	0,38	1,43	1,43	1,48	1,49	1,41	1,42
0,03	0,58	0,58	2,15	2,15	2,23	2,24	2,12	2,14
0,04	0,78	0,78	2,88	2,89	2,98	2,99	2,84	2,86
0,05	0,99	0,99	3,62	3,63	3,74	3,76	3,57	3,6
0,06	1,21	1,2	4,36	4,37	4,5	4,52	4,29	4,33
0,07	1,43	1,43	5,1	5,11	5,27	5,29	5,03	5,07
0,08	1,66	1,65	5,85	5,86	6,05	6,08	5,76	5,82
0,09	1,89	1,88	6,62	6,62	6,83	6,86	6,51	6,57
0,1	2,13	2,11	7,38	7,39	7,62	7,64	7,27	7,32

Рис. 3. Фрагмент калибровочной таблицы на восемь емкостей

Фрагмент калибровочной таблицы, представленный на рис. 3, содержит информацию об объеме нефтепродукта, находящегося в восьми емкостях, с пошаговым изменением уровня заполнения продуктом.

Каждый элемент этой таблицы показывает соответствие между уровнем в метрах и объемом продукта, находящегося в ёмкости, в кубических метрах. Калибровочная таблица составляется при нормальной температуре.

Полученные в результате калибровки значения объема и уровня необходимо представить в виде аналитической зависимости $V(y)$. В результате применения полиномиальной регрессии, получим зависимость вида:

$$V(y) = \sum_{i=0}^n a_i y^i. \quad (14)$$

Плотность продукта может быть определена несколькими методами. Как видно из рис. 1, в измерительном зонде (трубе с открытым концом) имеется несколько отверстий, в которых установлены датчики, в том числе плотномер. Таким образом, в первом случае возможно проведение k_1 измерений плотности на уровнях расположения отверстий в измерительном зонде. Во втором случае, по мере заполнения емкости, возможно перемещение датчика плотности на величину реперного шага, таким образом, может быть произведено k_2 измерений. Способ измерения плотности определяется исходя из технического оснащения резервуарного парка.

Аппроксимируя данные, полученные о плотности жидкости, получаем зависимость (для удобства пользуемся тем же видом ре-

грессии, что и для зависимости объема от уровня):

$$r(y) = \sum_{j=0}^m b_j y^j. \quad (15)$$

С учетом (14) и (15) выражение (13) примет вид:

$$M, \int_0^H \sum_{i=0}^n a_i y^i \cdot \sum_{j=0}^m b_j y^j dy. \quad (16)$$

Определив аналитические выражения для описания зависимостей объема и плотности от уровня наполнения возможно определять массу жидкости в резервуаре при любом значении уровня H .

Интеграл вида (16) легко вычисляется даже в аналитической форме, что удобно и даёт возможность для каждой емкости получить индивидуальную аналитическую зависимость, связывающую массу топлива в баке с его уровнем с учетом изменения плотности по глубине ёмкости.

Кроме того, выражение (16) даёт возможность создать универсальный алгоритм и программу обработки данных для ЭВМ, в которую будут вводиться только данные о коэффициентах аппроксимации и текущих значениях плотности.

Изложенные в статье способы значительно повышают точность измерений массы жидкости по сравнению с известными методами, так как основаны на нелинейной интерполяции экспериментальных калибровочных данных, что, несомненно, точнее дискретного сложения и линейной интерполяции

данных, применяемых в настоящее время на всех нефтебазах РФ.

ных топлив [Текст] / Б. В. Скворцов. – Самара: Изд-во СГАУ, 2000. – 264 с.

Библиографический список

1. Скворцов, Б.В. Электрофизические устройства контроля качества углеводород-

2. Скворцов, Б.В. Импульсные методы измерений количества и качества жидких углеводородных топлив [Текст] / Б.В. Скворцов, Борминский С. А. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2010. – 220 с.

METHOD TO IMPROVE ACCURACY MASS MEASUREMENT FLUID IN THE TANK

© 2012 A. V. Solntseva, B. V. Skvortsov, S. A. Borminsky

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

Considered two methods to improve the accuracy of measuring the mass of fluid in the tank based on the non-linear interpolation of the experimental calibration data. The first method is to find a transformation function mass and the total parameters of the fluid measured by monitoring with the help of the calibration model of the measurement process. The second method is based on the determination of an individual analytical dependence for the tank, connecting a lot of fluid, with its qualitative and quantitative parameters.

Fluid mass, reservoir, improve the accuracy, calibration, petroleum, interpolation of data.

Информация об авторах

Солнцева Александра Валерьевна, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: als063@mail.ru. Область научных интересов: аналитическое приборостроение.

Скворцов Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: aps@ssau.ru. Область научных интересов: аналитическое приборостроение.

Борминский Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: b80@mail.ru. Область научных интересов: аналитическое приборостроение.

Solntseva Alexandra Valeryevna, post-graduate student of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: als063@mail.ru. Area of research: analytical device construction.

Skvortsov Boris Vladamirovitch, doctor of technical science, professor of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: aps@ssau.ru. Area of research: analytical device construction.

Borminsky Sergey Anatolyevich, candidate of technical science, docent of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), doctoral of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: b80@mail.ru. Area of research: analytical device construction.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ

© 2012 С. А. Борминский

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

Предложен новый показатель для оценки детонационной стойкости углеводородных топлив – комплексный детонационный индекс, зависящий от их электрофизических параметров. Действительная часть индекса определяет детонационную стойкость топлив, мнимая – достоверность (соответствие стандарту). Исследованы зависимости между октановым и цетановым числом топлив с предложенным показателем. Приведена структурная схема прибора для измерений указанных характеристик.

Детонационная стойкость топлива, октановое число, комплексный детонационный индекс, устройство для измерения.

Характеристики углеводородных топлив (бензинов и дизельных топлив) определяют их эффективное сгорание и напрямую связаны с эксплуатационными и экологическими характеристиками транспортных средств. Оперативный контроль качественных характеристик углеводородных топлив без сжигания является актуальной задачей нефтехимической промышленности России.

Основная характеристика жидких углеводородных энергоносителей – детонационная стойкость. Ее мерой являются октановое число для бензинов и цетановое число для дизельных топлив. Оценка антидетонационных свойств бензина проводится методом сравнения их с двумя эталонными соединениями – изооктаном (2,2,4-триметилметаном), стойкость которого условно принята равной 100, и *n*-гептаном стойкостью 0. Смешением изооктана с *n*-гептаном в различных объемах получают промежуточные значения октановых чисел от 0 до 100 единиц. Октановое число выражается процентным содержанием изооктана в смеси с *n*-гептаном, которая при стандартных условиях испытаний детонирует так же, как и контролируемый бензин.

Цетановое число дизельных топлив является аналогом октанового числа бензинов и характеризует воспламеняемость при сжатии. В качестве эталонов для его определения

принимают гексадекан (цетановое число 100) и *a*-метилнафталин (цетановое число 0). Цетановое число численно соответствует содержанию цетана по объему в такой смеси цетана с *a*-метилнафталином, которая в стандартных условиях испытания равноценна по воспламеняемости испытываемому топливу.

Оперативный контроль качества углеводородных топлив важен и актуален для всех участников рыночных отношений – производителей, продавцов и покупателей, так как позволяет контролировать детонационную стойкость косвенным методом без сжигания. Хорошо известны методы и устройства, основанные на контроле диэлектрической проницаемости углеводородных топлив, косвенно связанной с показателями детонационной стойкости [1–4]. Недостатки известных методов состоят в том, что они не позволяют контролировать достоверность топлива, т.е. наличие в нем запрещенных стандартом [5] кислородных и металлосодержащих присадок, с одной стороны, повышающих октановое число, а с другой – ухудшающих экологические характеристики двигателей. Ниже дано теоретическое обоснование для создания устройства, позволяющего оперативно оценивать не только показатели детонационной стойкости, но и достоверность топлива с позиций содержания в нем запрещенных присадок.

Известно, что углеводородное топливо, как все другие среды, обладает комплексной относительной диэлектрической проницаемостью [2]:

$$\epsilon(w) = e'(w) - je''(w) = e'(w)[1 - j \cdot \operatorname{tg} \delta(w)], \quad (1)$$

где e' – действительная часть, определяющая диэлектрические свойства топлива; $e''(w) = 4ps(w)/(we_0)$ – мнимая часть; $s(w)$ – электрическая проводимость на рассматриваемой частоте w ; $e_0 = 8,85416 \cdot 10^{-12}$; δ – угол диэлектрических потерь.

В дальнейшем будем предполагать, что измерения проводятся на фиксированной частоте, поэтому частоту при обозначении компонентов диэлектрической проницаемости будем опускать. Мнимая часть в (1) характеризует поглощение энергии (диэлектрические потери) в веществе, введенном в электрическое поле, при этом тангенс угла потерь определяется по формуле $\operatorname{tg} \delta = e''/e'$.

В квазистатической и высокочастотной областях спектра значение ϵ'' практически очень мало. Только в диапазоне $\omega = 10^8 \dots 10^{11}$ Гц (область аномальной дисперсии) значение e'' становится существенным, а при критической частоте ω_0 достигает максимума и определяется процессом релаксации молекулы [6].

Показатели детонационной стойкости и диэлектрическая проницаемость топлив связаны соотношениями [2]:

октановое число Ω бензинов в диапазоне 78 – 100 единиц

$$\Omega = [-6.603 + 6.278e' - 1.470(e')^2] \cdot 10^3; \quad (2)$$

цетановое число Z дизельных топлив в диапазоне 45–54 единиц

$$Z = [-1391 + 1797e' - 7.97(e')^2 + 1.1(e')^3] \cdot 10^3. \quad (3)$$

Формулы (2), (3) получены на основе статистических исследований зависимостей октанового и цетанового чисел, соответственно, стандартных бензинов и дизельных топлив от диэлектрической проницаемости с последующей регрессионной обработкой данных. Исследования проводились экспериментально и с помощью математической программы статистического моделирования компонентного состава топлив.

Углеводородное топливо содержит ос-

новные компоненты, определяющие главные показатели качества (детонационную стойкость, теплоту сгорания и др.) и вредные неорганические примеси, например, воду, кислоты и другие кислородосодержащие соединения, имеющие полярные молекулы. В [2, 6] определены предельно возможные сочетания диэлектрической проницаемости, октанового числа стандартных бензинов и цетанового числа дизельных топлив. Основные компоненты топлив, в том числе высокооктановые ароматические углеводороды, имеют диэлектрическую проницаемость в диапазоне $\epsilon' = 1,8 \dots 2,4$ и на частоте $\omega = 10^6$ Гц низкую удельную проводимость $\sigma = 10^{-12} \dots 10^{-14}$ См/м. Тангенс угла потерь на указанной частоте в самых предельных случаях колеблется в диапазоне $\operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-4} \dots 130 \cdot 10^{-4}$. В большинстве случаев для высококачественных топлив можно ограничиться диапазоном $\operatorname{tg} \delta = (5 \dots 30) \cdot 10^{-4}$ [5].

Неорганические примеси (вода, кислоты, щёлочи, спирты) имеют диэлектрическую проницаемость в диапазоне $\epsilon = 3 \dots 80$ и относительно высокую удельную проводимость $\sigma = 10^4 \dots 10^6$ См/м, что на частоте $\omega = 10^6$ Гц соответствует тангенсу угла потерь $\operatorname{tg} \delta = 0,1 \dots 10$ [2]. Таким образом, если в контролируемый бензин попадает неорганическое соединение, то это приводит к одновременному увеличению диэлектрической проницаемости и проводимости. При этом тангенс угла диэлектрических потерь увеличивается значительно больше, чем диэлектрическая проницаемость. Следовательно, контролируя тангенс угла потерь, в общем случае можно судить о причинах повышения диэлектрической проницаемости бензина и вносить коррекцию в результаты измерений октанового числа.

Проиллюстрируем изложенное на примере. Пусть в бензин с диэлектрической проницаемостью e'_0 и тангенсом угла потерь $\operatorname{tg} \delta_0$ попадает объёмная доля ζ примесей с диэлектрической проницаемостью e'_n и тангенсом угла потерь $\operatorname{tg} \delta_n$. При этом результирующие диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь смеси будут иметь вид

$$e'_c = (1-x)e'_0 + e'_n x = e'_0 + x(e'_n - e'_0); \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \delta_c = (1-x)\operatorname{tg} \delta_0 + x\operatorname{tg} \delta_n = \operatorname{tg} \delta_0 + x(x\operatorname{tg} \delta_n - \operatorname{tg} \delta_0). \quad (5)$$

Например, если $\epsilon'_0 = 2,0$, $tg\delta_0 = 4 \cdot 10^{-3}$ (что в нормальных стандартных бензинах соответствует октановому числу 78...80), $\epsilon'_n = 80$, $tg\delta_n = 1$, то при $\zeta = 0,001$ получим $\epsilon'_c = 2,078$; $tg\delta_c = 0,005$. Таким образом, добавление в топливо, например, 0,1 % объёмной доли воды приводит к изменению диэлектрической проницаемости на 3,9 % (что соответствует увеличению октанового числа на 10–12 единиц), а тангенса угла потерь на 25 %. Контролируя изменения тангенса угла потерь можно судить о причинах увеличения диэлектрической проницаемости и корректировать результаты измерения. Более того, ввести показатель подлинности бензина.

Для косвенной оценки топлива без сжигания можно предложить новый показатель качества – комплексный электрофизический детонационный индекс (CDI), связанный с детонационной стойкостью и подлинностью топлива (наличием в нем компонентов, не разрешенных техническими условиями, в частности, неорганических соединений).

Индекс CDI должен удовлетворять следующим требованиям. Он должен состоять из двух составляющих – индексов детонационной стойкости (IDS) и недостоверности топлива (INT), которые можно оценить раздельно количественно, причём принцип измерения должен быть основан на калибровке по эталонным компонентам, применяемым для калибровки моторных установок.

Индекс IDS должен быть косвенно связан с детонационной стойкостью топлива – октановым числом бензинов или цетановым числом дизельных топлив. Изменение IDS в диапазоне 0 – 2,0 должно соответствовать изменению октанового числа от 0 до 200, при этом единица должна соответствовать октановому числу 100.

Индекс INT должен быть косвенно связан с процентным содержанием неорганических соединений в топливе. Изменение INT в диапазоне 0 – 1,0 должно соответствовать вероятности применения в топливе компонентов, не разрешенных техническими условиями, зарегистрированными во Всероссийском научно-исследовательском

институте по переработке нефти (ВНИИ НП).

Указанным требованиям удовлетворяет комплексный детонационный индекс, определяемый как отношение комплексных диэлектрических проницаемостей контролируемого и эталонного топлив:

$$CDI = \frac{\epsilon'_c (1 - jtg\delta_c)}{\epsilon'_0 (1 - jtg\delta_0)} - \frac{\epsilon'_n [(1 + tg\delta_n tg\delta_0) + j(tg\delta_n - tg\delta_0)]}{\epsilon'_c (1 - tg^2\delta_c)} = IDS - jINT, \quad (6)$$

где

$$IDS = \frac{\epsilon'_c (1 + tg\delta_n tg\delta_0)}{\epsilon'_0 (1 + tg^2\delta_0)} \quad (7)$$

индекс детонационной стойкости (действительная часть CDI);

$$INT = \frac{(tg\delta_n - tg\delta_0)}{\epsilon'_c (1 + tg^2\delta_0)} \quad (8)$$

индекс недостоверности топлива (мнимая часть CDI); $\epsilon'_0, \epsilon'_c, tg\delta_0, tg\delta_c$ – диэлектрические проницаемости и тангенсы углов диэлектрических потерь соответственно эталонного и контролируемого топлив.

При этом, в качестве эталонного компонента для бензинов следует признать толуол, который из всех эталонных жидкостей имеет самые близкие к средним значениям для ароматических углеводородов октановое число $\Omega = 108$, диэлектрическую проницаемость $\epsilon' = 2,362$ и тангенс угла потерь $tg\delta_0 = 122,8 \cdot 10^{-4}$ [7]. Таким образом, контролируемые стандартные бензины, имеющие октановое число меньше 108, будут иметь индекс детонационной стойкости меньше 1 и индекс недостоверности, близкий к 0, если в них нет неорганических добавок. В качестве эталонного компонента для дизельных топлив следует принять α – метилнафталин, который при нулевом цетановом числе $Z = 0$ имеет максимальную диэлектрическую проницаемость $\epsilon'_c = 2,664$ и близкое к среднему для ароматических углеводородов значение тангенса угла потерь $tg\delta_c = 165,8 \cdot 10^{-4}$ [7].

Таким образом, все стандартные дизельные топлива с $Z > 0$ будут иметь индекс детонационной стойкости меньше единицы и индекс недостоверности, близкий к нулю,

если в них нет неорганических компонентов. Отметим, что для всех углеводородных топлив $tge' < 1$, поэтому для индекса детонационной стойкости можно записать

$$IDS \approx e' / e_3'. \quad (9)$$

Тангенс угла потерь фальсифицированных топлив, как правило, значительно больше стандартного, поэтому индекс недоверности топлива целесообразно выражать мнимой частью CDI, т. е. формулой (8).

На основе проведенных исследований

разработан прибор [9], позволяющий измерять октановое число бензинов, цетановое число дизельных топлив, комплексный детонационный индекс CDI, состоящий из индекса детонационной стойкости IDS и индекса недоверности топлива INT. Прибор позволяет анализировать подлинность топлива с точки зрения наличия в нем недопустимых по [5] неорганических присадок.

Структурная схема прибора изображена на рис.1. Контролируемые показатели вычисляются по формулам (2) – (9).

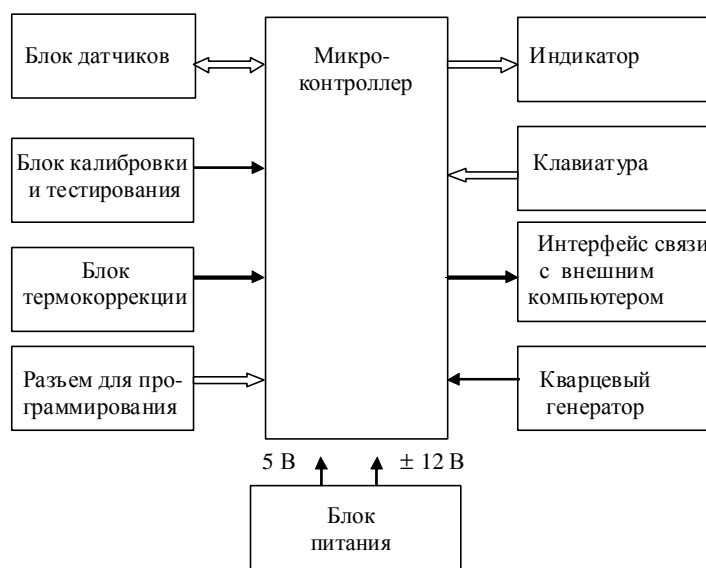


Рис. 1. Обобщенная структурная схема портативного прибора контроля ДСТ

Ядром схемы является микроконтроллер, к которому подсоединяются основные функциональные блоки: датчики, одним из которых обязательно является датчик температуры, входящий в блок термокоррекции, индикатор, клавиатура управления прибором, а также вспомогательные устройства, обеспечивающие возможности связей с программатором и внешним компьютером.

В последнее время появились новые микросхемы, которые можно использовать для прецизионного измерения ёмкости и определения тангенса угла потерь [9]. В частности, для измерения ёмкости в разработанном приборе используется специализированная микросхема AD7747, состоящая из задающего генератора, усилителя с высоким входным сопротивлением и 24-разрядного АЦП. Всё это позволяет измерять ёмкость в

диапазоне 0...8 пФ с точностью до 10 фФ. Благодаря высокой чувствительности микросхемы в качестве ёмкостного датчика выбран коаксиальный конденсатор малых размеров – диаметр составляет 3 см, высота – 2 см. Выбор коаксиальной конструкции датчика обусловлен наибольшей механической стойкостью к внешним воздействиям, что является необходимым для получения высоких метрологических характеристик.

Для определения потерь в разработанном приборе измеряется проводимость среды на постоянном токе. Нефтепродукты являются хорошими диэлектриками, что требует измерения крайне высоких сопротивлений. В частности, сопротивление ёмкостного датчика, погруженного в измеряемую среду, колеблется в зависимости от типа топлива от 10 до 150 ГОм. Точное измерение высоких

сопротивлений требует специальной элементной базы, при этом необходимо тщательно продумывать конструкцию и изоляцию узлов внутри прибора. Для измерения сопротивления выбран операционный усилитель LMC6061, входное сопротивление которого превышает 10 ГОм. Благодаря применению высокоомного операционного усилителя, для измерения сопротивления не требуется высокое напряжение, как в классических

конструкциях подобных измерителей, а достаточно применять напряжение +5В, что упрощает конструкцию прибора.

Для уменьшения влияния помех и сопротивления подключаемых проводов, микросхемы измерения ёмкости и проводимости расположены в непосредственной близости к датчику. Принципиальная схема датчика показана на рис. 2.

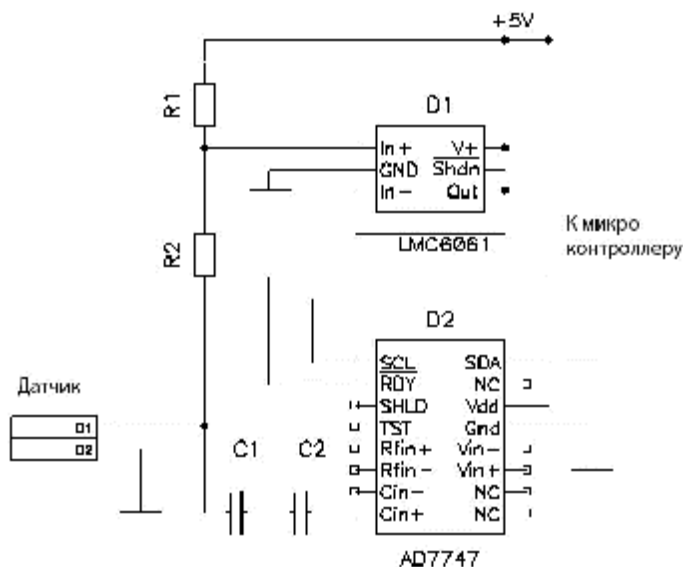


Рис. 2. Принципиальная схема датчика

Резистор $R1 = 10 \text{ ГОм}$ является опорным для измерения проводимости. Резистор $R2$ и конденсаторы $C1, C2$ разделяют переменную и постоянную составляющие сигнала на разные микросхемы.

Для увеличения точности измерений одновременно с формулами (2-9) в приборе используется алгоритм совокупно-косвенных измерений. Сущность алгоритма состоит в том, что происходит уточнение функции вычисления результатов F с помощью калибровочной модели процесса измерения. Решение возможно при условии, что число калибровочных эталонных топлив будет больше одного. Использование только двух эталонных топлив с известным значением исследуемого показателя качества приводит к линеаризации калибровочной модели. Если имеется $n+1$ эталонных топлив с известными показателями детонационной стойкости $Q_0, Q_1, Q_2, \dots, Q_n$, а также для эталонных топлив из-

вестны измерения соответствующих значений комплексных диэлектрических проницаемостей $q_0, q_1, q_2, \dots, q_n$, тогда уравнение, связывающее искомый показатель качества исследуемого топлива с рассматриваемым электрофизическим параметром определится так:

$$Q_x = b_0 + b_1 q_x + b_2 q_x^2 + \dots + b_n q_x^n + \sum_{k=1}^n b_k q_x^k \quad (10)$$

Применение вышеописанных формул и схем позволило создать прибор, способный измерять детонационную стойкость с точностью до 0,5%, а полученный индекс достоверности топлива позволяет выявить большинство топлив, изготовленных с нарушениями техпроцесса.

Библиографический список

1. Скворцов, Б.В. Импульсные методы измерений количества и качества жидких углеводородных топлив [Текст] / Б.В. Сквор-

цов, С.А. Борминский. – Самара: СНЦ РАН, 2010. – 220 с.

2. Скворцов, Б.В. Приборы и системы контроля качества нефтепродуктов [Текст] / Б.В. Скворцов, Н.Е. Конюхов, В.Н. Астапов. - М.: Энергоатомиздат, 2000. – 226 с.

3. Пат. 2206085. Российская Федерация. Устройство для оперативного измерения октанового числа бензинов [Текст] / Б.В. Скворцов, С.Г. Синников, В.Н. Астапов опубл. 10.2003. Бюл. № 16.

4. Таблицы физических величин. Справ. пособие [Текст] / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

5. ГОСТ Р 2084–77. Бензины автомобильные. Технические условия. [Текст] – М.: Изд-во стандартов, 2001.

6. Скворцов, Б. В. Исследование кор-

реляционных зависимостей между октановым числом и электродинамическими параметрами углеводородных продуктов [Текст] / Б. В. Скворцов, Е.А. Силов /Изв. Самарского науч. центра РАН. 2009. № 5.

7. Шахпаронов, М.И. Жидкие углеводороды и нефтепродукты [Текст] / М. И. Шахпаронов, Л.П. Филиппов – М.: Изд-во МГУ, 1989.

8. Пат. 66542. Российская Федерация. Устройство измерения показателей детонационной стойкости и достоверности углеводородных топлив [Текст] / Скворцов Б.В., Борминский С.А. Изобретения. Полезные модели. 2007. № 25.

9. Официальный сайт фирмы Analog Devices [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.analog.com/en/data-converters/products/index.html>

MEASUREMENT OF HYDROCARBON FUELS QUALITY FACTOR. PRECISION INCREASE

© 2012 S. A. Borminsky

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

The study suggests a new index to assess hydrocarbon fuels antiknock value. This is a complex antiknock index, which depends on fuels' electrophysical parameters. Actual index part characterizes fuel's antiknock value, virtual part stands for its fit (compliance with standards). The research analyses relationship between octane and cetane number, taking into consideration index suggested. The article presents a structure diagram of measurement device.

Hydrocarbon fuels antiknock value, octane number, complex antiknock index, measurement device.

Информация об авторах

Борминский Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: b80@mail.ru. Область научных интересов: аналитическое приборостроение.

Borminsky Sergey Anatolyevich, candidate of technical science, assistant professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: b80@mail.ru. Area of research: analytical device construction.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ СЕТЕЙ ПЕТРИ

© 2012 В. А. Зеленский, В. П. Коннов, А. И. Щодро

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

Имитационное моделирование производственных процессов позволяет сократить время разработки технологической документации, снизить производственные издержки, сделать оптимальный выбор оборудования, повысить производительность труда. Показано, что использование аппарата сетей Петри позволяет создать моделирующую среду и описать основные параметры производственного процесса. Приведен пример решения оптимизационной задачи.

Имитационное моделирование производственных процессов, сети Петри, моделирующая среда, производственный цикл

Моделирование производственных процессов позволяет сократить сроки разработки технологических документов (маршрутных, операционных карт и др.), снизить стоимость разработки производственных линий, оптимальным образом выбрать оборудование, повысить производительность труда. Проблема моделирования производственных процессов заключается в том, что они трудно поддаются формальному описанию [1]. Создать имитационную модель производственного процесса в парадигме системной динамики или агентного моделирования на практике оказывается чрезвычайно сложно. Более целесообразно использование дискретно-событийной парадигмы имитационного моделирования, позволяющей решить актуальную задачу создания и анализа модели производственного процесса [2, 3].

Производственный процесс определяется как совокупность действий работников и орудий труда, в результате которых сырьё, материалы, полуфабрикаты и комплектующие изделия, поступающие на предприятие, превращаются в готовую продукцию в заданном количестве, с требуемым качеством и в установленные сроки. Производственный процесс состоит из основных, вспомогательных и обслуживающих процессов. Основными процессами считаются технологические

процессы, в ходе которых происходят изменения геометрических форм, размеров и физико-химических свойств продукции. Под вспомогательными процессами будем понимать процессы, которые обеспечивают бесперебойное протекание основных процессов. Существуют также обслуживающие процессы, связанные с обслуживанием как основных, так и вспомогательных процессов и не создающие продукцию (хранение, транспортировка, технический контроль и т.д.).

Иерархия парадигмы, математического аппарата и инструментария имитационного моделирования показаны на рис. 1.

В качестве математического аппарата имитационного моделирования предлагается использовать сети Петри [4]. Сети Петри характеризуются: качественным описанием, количественными компонентами и функциями сети, начальной маркировкой сети, функцией переходов. Будем рассматривать ординарные автоматные сети Петри, не содержащие вложений и не оперирующие разнородными метками [5]. Геометрически данные сети отображаются двудольным планарным ориентированным графом, который не содержит кратных дуг, не содержит пересекающихся дуг, не содержит петель, содержит один или несколько циклов. Количественные компоненты и функции

сети Петри, можно представить в виде набора переменных $\{P, T, I, O\}$, где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ – множество мест (позиций); $T = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$ – множество переходов; I – входная функция сети; O – выходная функция сети.

Входная и выходная функция сети могут быть заданы в виде матриц инцидентности, строками которых являются

номера переходов, а столбцами – номера мест. Если переход i инцидентен месту j – значением элемента матрицы с индексами ij будет «1», в противном случае – «0». Таким образом, матрицы входной и выходной функции сети являются булевыми матрицами, что упрощает операции с ними.



Рис. 1. Парадигма, математический аппарат и инструментарий имитационного моделирования

Начальная маркировка (разметка) сети определяется количеством и расположением меток (называемых также фишками) и выбирается случайно с равной степенью вероятности относительно множества мест P . Предполагается, что метки

однородны и инвариантны к функциям сети. В автоматных сетях Петри, которые мы рассматриваем, общее количество меток после срабатывания перехода всегда равно их первоначальному количеству (рис. 2).

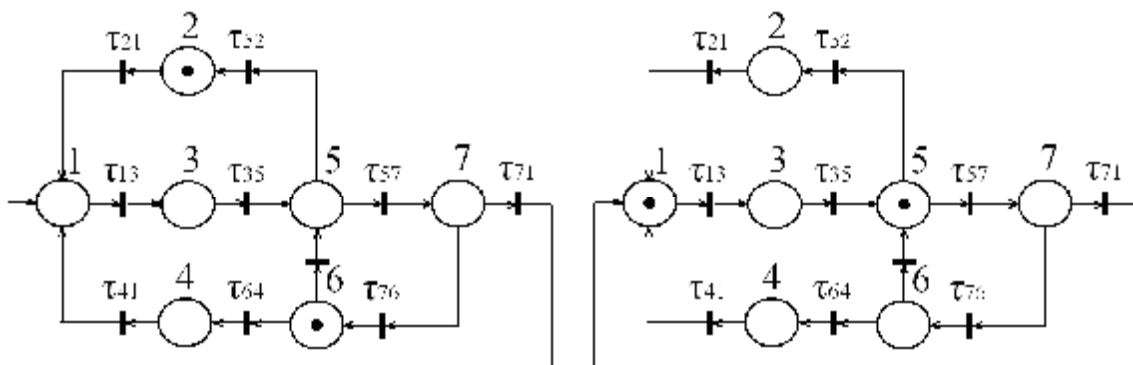


Рис. 2. Сеть Петри до и после срабатывания переходов

Переход разрешен, если каждое его входное место содержит не менее одной метки. Правило выполнения (срабатывания) переходов состоит в том, что сработать может только разрешенный переход, при этом выбор выполняемого перехода производится равновероятно относительно общего количества разрешенных переходов. При выполнении перехода из каждого его входного места изымается по одной метке, а в каждое выходное место добавляется по одной. Для автоматных сетей данное правило упрощается, т.к. каждый переход имеет только одно входное и одно выходное место.

В качестве инструмента для реализации аппарата сетей Петри выбрана программа *HPSim* компании *Henryk Anschuetz*. Программа написана на *Visual C++*, предполагает возможность визуального программирования и поддерживает классические сети Петри. Распространяется в соответствии с лицензией *GNU General Public License*.

Интерфейс выполнен в привычном для пользователя оконном стиле, предоставляется набор инструментов для визуального программирования, а также сред-

ства загрузки, редактирования и хранения результатов. Исследование состоит из двух этапов – создание модели производственного процесса в программной среде и выполнение имитационного эксперимента. Анализ результатов моделирования целесообразно проводить методом Монте-Карло.

Рассмотрим примеры создания и анализа производственных процессов в программной среде *HPSim*. На рис. 3 в упрощенном виде представлена модель производства кровельного материала (черепицы). Готовый продукт получается из четырех основных ингредиентов – цемента, песка, пигмента и воды. Требуемый вид черепицы придается на формообразующем станке. После этого партия черепицы укладывается на поддон и поступает в пропарочную камеру. Далее происходит распалубка, в результате чего на выходе процесса получают готовые изделия, а пустой поддон возвращается в технологический цикл. Производительность линии определяется количеством пустых поддонов и скоростью их подготовки для работы с новой партией черепицы.

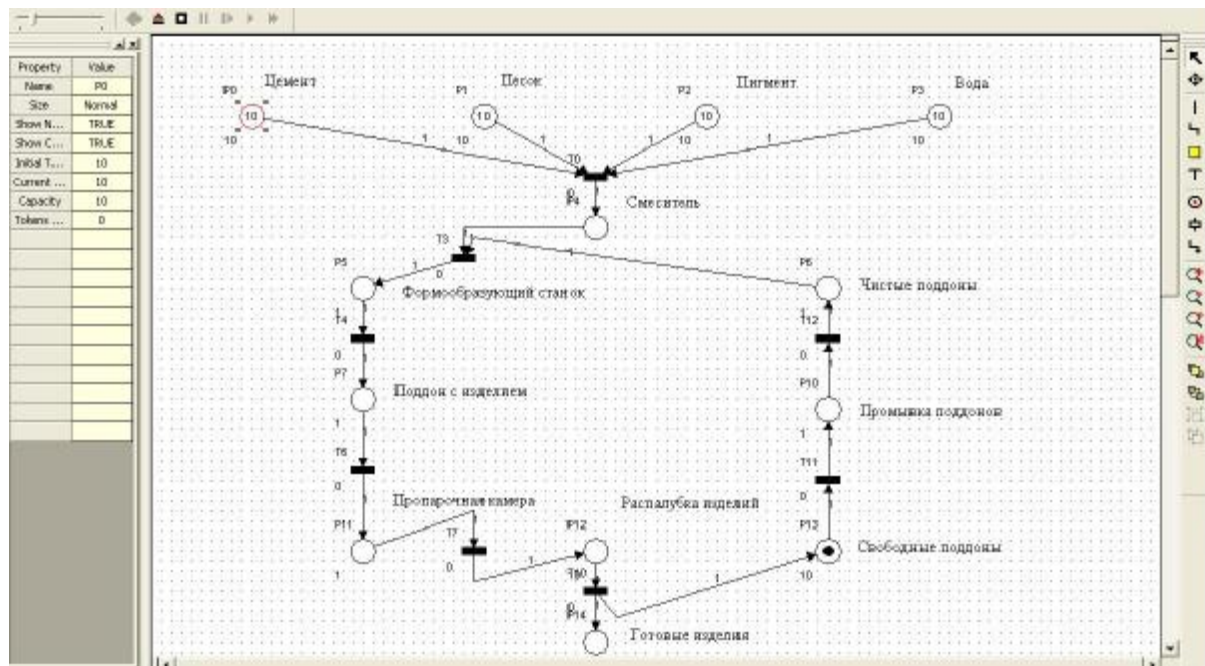


Рис. 3. Имитационная модель процесса производства черепицы

Результаты имитационного эксперимента представлены в табл. 1. Из результатов эксперимента следует, что затраты на оборудование не приводят к по-

стоянному росту производительности линии. Так, например, для данных условий эксперимента оптимальное количество используемых поддонов равно четырем.

Таблица 1. Результаты эксперимента с кровельным материалом

Количество поддонов, шт	1	2	3	4	5	6
Производительность, партия/ед. времени	73	39	29	26	26	26

На рис. 4 представлена другая модель производственного процесса – ремонт и восстановление сложных технических изделий.

его разборки дифференцируются на годные, дефектные и требующие ремонта. Понятно, что процент годных, дефектных и требующих ремонта сборочных единиц – величина случайная. Количество восстановленных изделий также зависит от наличия запасных частей на складе ремонтного предприятия.

Требующее ремонта изделие после необходимой подготовки диагностируется на предмет соответствия параметрам: герметичность, давление и производительность. Составные части изделия после

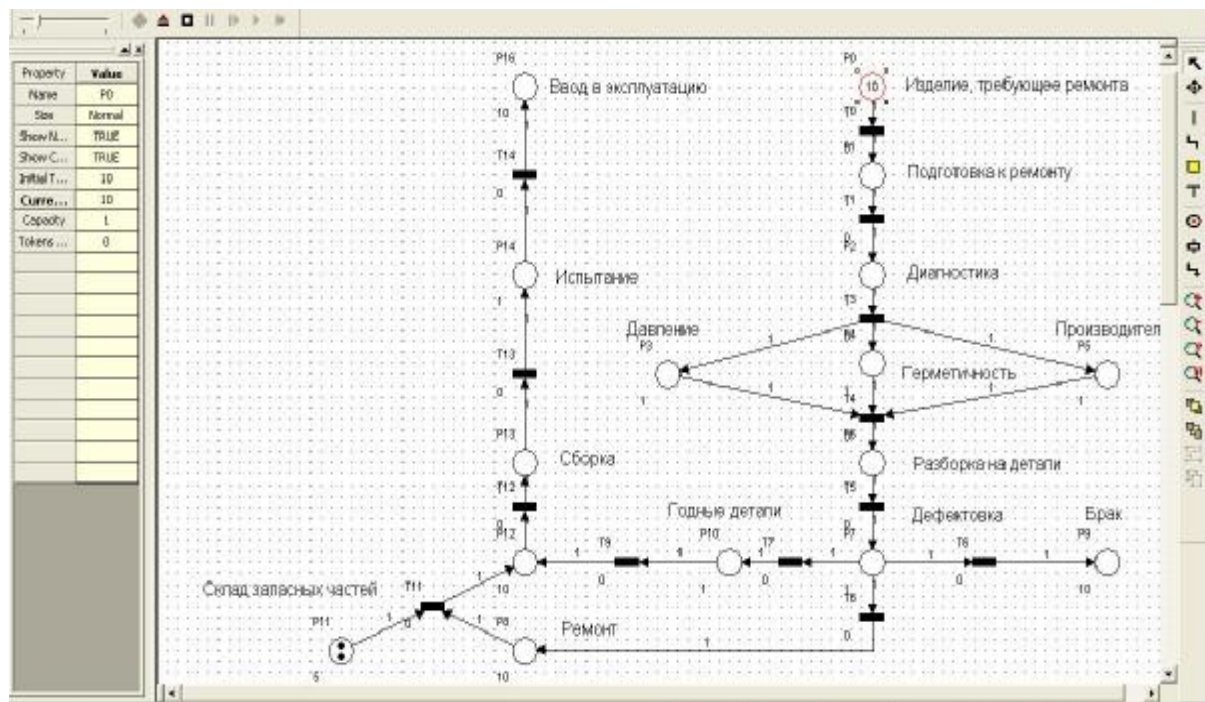


Рис. 4. Имитационная модель процесса ремонта сложных технических изделий

Результаты имитационного эксперимента представлены в табл. 2. Из результатов эксперимента следует, что постоянный рост затрат на увеличение количества запасных частей на складе не приводит к увеличению процента восстановленных

изделий. Так, например, для данных условий эксперимента оптимальное количество деталей на складе равно трем. При дальнейшем увеличении этого параметра среднее количество изделий, введенных в эксплуатацию не превышает число 6,5.

Таблица 2. Количество сложных технических изделий, введенных в эксплуатацию

Количество запчастей на складе, шт	Номер имитационного эксперимента										Среднее кол-во запчастей, шт
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	5	3	2	3	4	6	3	4	5	4	3,9
2	6	4	3	4	5	6	4	6	5	5	4,8
3	7	4	4	5	7	7	5	7	5	6	6,4
4	8	5	5	6	7	8	7	8	6	7	6,5
5	8	4	6	7	6	7	6	7	7	7	6,4

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выбранная парадигма моделирования, математический аппарат и инструментальное средство позволяют производить имитационное моделирование и анализ производственных процессов, решать оптимизационные задачи.

2. Преимуществом заявленного подхода является обоснованность выбора дискретно-событийной парадигмы моделирования, универсальность и гибкость математического аппарата, использование свободного программного обеспечения, поддерживающего визуальное программирование.

3. Полученные результаты могут быть использованы в научно-исследовательской работе, в учебном процессе, а также стать предметом коммерциализации научной деятельности.

Библиографический список

1. Норенков, И.П. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS – технологии [Текст] / И.П. Норенков, П.К. Кузьмик. - М.: Изд-во МВТУ

им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.

2. Зеленский, В.А. Выбор парадигмы, математического аппарата и инструментов моделирования технологических процессов в машиностроении и нефтегазовой промышленности [Текст] / В.А. Зеленский, В.П. Коннов, А.И. Щодро // Материалы IV Всероссийской НПК с международным участием «Математическое моделирование, численные методы и информационные системы». – Самара: Изд-во СМиУ, 2012. – С. 113 - 120.

3. Зеленский, В.А. Моделирование технологических процессов с помощью сетей Петри [Текст] / В.А. Зеленский, В.П. Коннов, А.И. Щодро // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». – Самара: Изд-во СГАУ, 2012. - С. 286 - 290.

4. Петерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем [Текст] / Дж. Петерсон. – М.: Мир, 1984. – 412 с.

5. Голубятников, И.В. Системы мониторинга сложных объектов [Текст] / И.В. Голубятников, В.А. Зеленский, В.Е. Шатерников – М.: Машиностроение, 2009. – 172 с.

SIMULATION OF OPERAITING CYCLE BY PETRY NETS

© 2012 V. A. Zelenskiy, V. P. Konnov, A. I. Schodro

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

Simulation of operating cycles let curtail develop technology documents time, reduce working losses, make selection equipment optimum, develop flow rate of work. The use of planning and control techniques based on Petri net allows creating modeling system and defining main parameters of process. An example of a problem solution is given.

Simulation of operation cycle, Petri net, modeling system, flow rate of work.

Информация об авторах

Зеленский Владимир Анатольевич, профессор кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, доктор технических наук, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: vaz-3@mail.ru. Область научных интересов: имитационное моделирование, информационно-измерительные системы, элементы систем управления.

Коннов Вадим Петрович, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: vl.z@mail.ru. Область научных интересов: имитационное моделирование, информационно-измерительные системы, элементы систем управления.

Щодро Артём Игоревич, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: vl.z@mail.ru. Область научных интересов: имитационное моделирование, информационно-измерительные системы, элементы систем управления.

Zelenskiy Vladimir Anatolyevich, professor of radio devices design department, Dr. Sci. tech., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: vaz-3@mail.ru. Area of research: simulation, information-measuring device systems, units of management systems.

Konnov Vadim Petrovich, aspirant of radio devices design department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: vl.z@mail.ru. Area of research: simulation, information-measuring device systems, units of management systems.

Schodro Artyom Igorevich, aspirant of radio devices design department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: vl.z@mail.ru. Area of research: simulation, information-measuring device systems, units of management systems.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В СТАЦИОНАРНЫХ И ДВИЖУЩИХСЯ СРЕДАХ

© 2012 Б. В. Скворцов, Д. Б. Скворцов, А. Н. Мальшева-Стройкова

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

В работе математически описывается энергетическое поле, созданное излучающим импульсом при распространении его в неоднородной поглощающей среде. Дается трехмерное математическое описание и алгоритм расчета процесса распространения направленных импульсных сигналов в неоднородных поглощающих стационарных и движущихся средах. Определяется энергия импульса и групповая скорость. Изменение амплитуды и спектрального состава импульса, прошедшего через исследуемую, среду дает диагностическую информацию о среде.

Направленный импульс, волновой вектор, неоднородная среда, коэффициент поглощения, фазовая скорость, математическое описание, алгоритм расчёта, энергия.

Теоретические основы распространения импульсных сигналов в различных средах рассмотрены в фундаментальных работах [1, 2], результаты которых требуют дальнейшего осмысления и развития с точки зрения возможностей и методики их практического применения. Импульсное зондирование применяется для исследования физико-химических свойств сред и объектов [3]. Импульсные сигналы, взаимодействующие с контролируемой средой или объектом, исчерпаемы по своим информационным и технологическим возможностям.

Направленный зондирующий импульс любой физической природы (электромагнитный, акустический), действующий в какой-либо точке пространства, в общем случае является вектором (рис. 1).

Импульс может быть произвольной формы и описывается выражением:

$$\bar{p}(O,t) = \bar{i}p_x(O,t) + \bar{j}p_y(O,t) + \bar{k}p_z(O,t), \quad (1)$$

где под точкой «O» будем понимать координаты точки излучения (x_0, y_0, z_0) . Отметим, что мы намеренно не совмещаем точку излучения с началом координат, так как среда может облучаться синхронно из нескольких точек, что может привести в дальнейшем к неточности описания. Импульс исчерпывающим образом описывается комплексной спектральной амплитудой $S(j\omega)$, которая определяется как преобразование Фурье от исходного сигнала и представляет собой набор синусоидальных сигналов разной амплитуды и фазы:

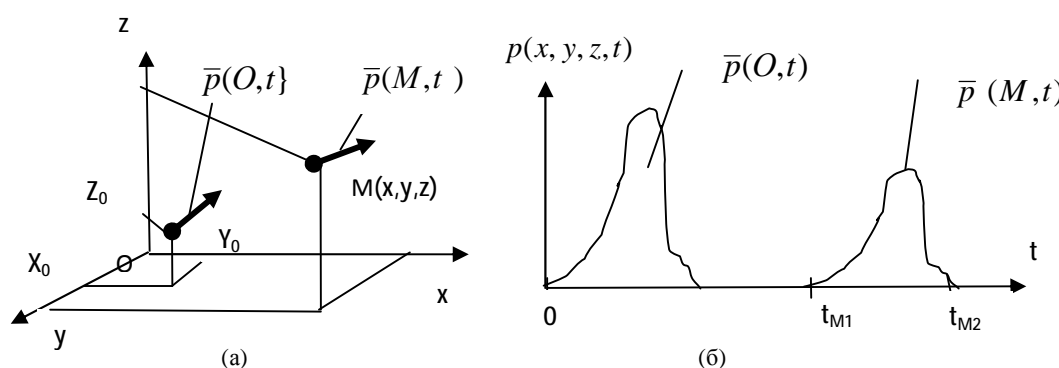


Рис. 1. Иллюстрация к постановке задачи распространения импульса в неподвижной среде

$$\begin{aligned} \bar{S}(O, jw) &= F[\bar{p}(o, t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}(O, t) e^{-jw t} dt = \\ &= \bar{i}S_x(O, jw) + \bar{j}S_y(O, jw) + \bar{k}S_z(O, jw). \end{aligned} \quad (2)$$

Изменение амплитуды и спектрального состава зондирующего импульса, прошедшего через исследуемую среду, дает информацию о среде или объекте. Распространяясь в среде, импульс может в общем случае изменять форму и направление, что определяется свойствами среды.

Рассмотрим сначала неподвижную неоднородную среду.

Любая среда, в которой распространяется и с которой взаимодействует направленный энергетический импульс, характеризуется комплексным волновым вектором, который, согласно [1,4], является дважды вектором – как комплексное число и как направление. Для неоднородной среды волновой вектор, является функцией не только частоты, но и пространственных координат, которые для компактности представим в виде расстояния от начала координат до текущей точки:

$$\begin{aligned} \bar{k}(jw, R) &= \bar{k}'(w, R) - j\bar{k}''(w, R) = \\ &= \bar{i}k_x(jw, R) + \bar{j}k_y(jw, R) + \bar{k}k_z(jw, R), \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \\ k_x(jw, R) &= k'_x(w, R) - jk''_x(w, R); \\ k_y(jw, R) &= k'_y(w, R) - jk''_y(w, R); \\ k_z(jw, R) &= k'_z(w, R) - jk''_z(w, R); \\ \bar{k}'(w, R) &= \bar{i}k'_x(w, R) + \bar{j}k'_y(w, R) + \bar{k}k'_z(w, R); \\ \bar{k}''(w, R) &= \bar{i}k''_x(w, R) + \bar{j}k''_y(w, R) + \bar{k}k''_z(w, R). \end{aligned} \quad (4)$$

Модули компонентов волнового вектора определяются по формулам, определяющим модуль комплексного числа:

$$\begin{aligned} |\bar{k}'(w, R)| &= \sqrt{[k'_x(w, R)]^2 + [k'_y(w, R)]^2 + [k'_z(w, R)]^2}; \\ |\bar{k}''(w, R)| &= \sqrt{[k''_x(w, R)]^2 + [k''_y(w, R)]^2 + [k''_z(w, R)]^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Полный модуль волнового вектора определится:

$$|\bar{k}(jw, R)| = \sqrt{|\bar{k}'(w, R)|^2 + |\bar{k}''(w, R)|^2}. \quad (6)$$

Здесь и в дальнейшем следует различать j – как мнимую часть комплексного числа; $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – как единичные векторы декартовой системы координат, \bar{k} – как волновой вектор.

Компоненты волнового вектора определяются свойствами среды и направленностью зондирующего импульса [1, 4]. Действительная часть волнового вектора определяет вектор фазовой скорости распространения импульса [м/сек]:

$$\begin{aligned} \bar{V}_\phi(w, R) &= \frac{w}{\bar{k}'(w, R)} = \\ &= \frac{w}{|\bar{k}'(w, R)|^2} [\bar{i}k'_x(w, R) + \bar{j}k'_y(w, R) + \bar{k}k'_z(w, R)] = \\ &= \bar{i}V_{\phi_x}(w, R) + \bar{j}V_{\phi_y}(w, R) + \bar{k}V_{\phi_z}(w, R); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\bar{k}'(w, R) = \frac{w}{V_\phi(w, R)} = \frac{w\bar{V}_\phi(w, R)}{|\bar{V}_\phi(w, R)|^2}. \quad (8)$$

Мнимая часть определяет вектор поглощения, [1/м]:

$$\begin{aligned} \bar{a}(w, R) &= \bar{k}''(w, R) = \bar{i}k''_x(w, R) + \bar{j}k''_y(w, R) + \bar{k}k''_z(w, R) = \\ &= \bar{i}a_x(w, R) + \bar{j}a_y(w, R) + \bar{k}a_z(w, R). \end{aligned} \quad (9)$$

Отметим, что именно направленность излучения требует достаточно необычной трактовки понятия коэффициента поглощения как вектора. В неоднородной среде фазовая скорость и коэффициент поглощения являются функцией координат, то есть могут менять направление.

Сущность такого описания состоит в том, что среда может иметь разные свойства по направлениям в смысле скорости распространения и коэффициента поглощения.

При этом составляющие вектора (3) должны удовлетворять преобразованиям Гильберта:

$$\begin{aligned} \bar{k}'(w, R) &= -\frac{1}{p} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\bar{k}''(u, R)}{u-w} du; \\ \bar{k}''(w, R) &= \frac{1}{p} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\bar{k}'(u, R)}{u-w} du, \end{aligned} \quad (10)$$

определяющим принципиальную возможность существования непрерывного энергетического поля и однозначное соответствие между фазовой скоростью распространения и коэффициентом поглощения энергетической

волны в поглощающей среде, u – формальный параметр интегрирования. Отметим, что в частных случаях, например, для электромагнитных полей в пассивных средах выражения (10) приводят к известным формулам Крамерса-Кронига, определяющим взаимосвязи компонентов комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей сред [1, 6].

Для однородной среды:

$$\begin{aligned} \bar{k}(j\omega, R) &= \bar{k}(j\omega); \bar{V}_\Phi(w, R) = \bar{V}_\Phi(w); \\ \bar{a}(w, R) &= \bar{a}(w). \end{aligned} \quad (11)$$

Конкретные выражения для волнового вектора электромагнитных и акустических сигналов в различных средах приведены в работах [2, 4, 7 – 9].

Отметим, что в классической теории волновых процессов в непоглощающих однородных средах волновой вектор определяет число длин волн, уместающихся на единице длины [1/м]. В поглощающих средах волновой вектор также имеет размерность [1/м], однако здесь его физическая трактовка больше согласуется с комплексным коэффициентом поглощения пакета энергии, распространяющегося в среде, которая, по аналогии с электричеством, может быть активной, проявляющейся, например, в виде нагревания среды, и реактивной, определяемой электромагнитными или квантово-механическими процессами в зоне следования импульса.

На основании (10) можно предположить, что любая поглощающая (пассивная) среда имеет строго определенную пару составляющих волнового вектора $\{\bar{k}'(w, R), \bar{k}''(w, R)\}$, которая может служить основой для её идентификации. При этом координатные составляющие и частотные зависимости волнового вектора определяют многообразные возможности создания идентификационной базы сред и объектов. Отметим, что все среды, кроме вакуума, частотно зависимы по параметрам волнового вектора. Вакуум – это единственная среда, для которой $\bar{k}'(w, R) = Const, \bar{k}''(w, R) = 0$ при электромагнитных сигналах, и $\bar{k}'(w, R) = 0, \bar{k}''(w, R) = \infty$ при акустических сигналах, что не противоречит формулам (10).

В работе [6] на основе анализа работ [1,2] получено аналитическое выражение, моделирующее распространение импульса в однородной поглощающей среде, которое имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{p}(r, t) &= \frac{1}{2p} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{S}(O, j\omega) e^{j[\omega t - \bar{k}(j\omega)\bar{r}]} d\omega = \\ &= \frac{1}{2p} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}(O, j\omega) e^{j[(t-t')\omega - \bar{k}(j\omega)\bar{r}]} dt' d\omega = \\ &= \frac{1}{2p} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}(O, t') e^{-j[\bar{a}(w)\bar{r}]_r} e^{j\omega \left[(t-t') - \frac{\bar{r}}{|\bar{V}_\Phi(w)|} \right]} dt' d\omega, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\bar{r} = \bar{i}(x-x_0) + \bar{j}(y-y_0) + \bar{k}(z-z_0)$ – радиус-вектор заданной точки пространства относительно точки излучения;

$$r = |\bar{r}| = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}; \quad (13)$$

$\bar{k}(j\omega)$ – трехмерный волновой вектор, параметры которого в указанных работах предполагались независимыми от пространственных координат;

$$\begin{aligned} \bar{k}(j\omega) \cdot \bar{r} &= (x-x_0)k_x(j\omega) + (y-y_0)k_y(j\omega) + \\ &+ (z-z_0)k_z(j\omega) - \end{aligned} \quad (14)$$

скалярное произведение волнового вектора на радиус-вектор заданной точки пространства; τ – формальный параметр интегрирования.

В однородной среде импульс не может изменить своего направления, поэтому $\bar{p}(O, t), \bar{k}(j\omega), \bar{V}_\Phi(w), \bar{a}(w), \bar{r}, \bar{p}(r, t)$ вектора коллинеарны, то есть совпадают по направлению.

Формулы (12) предполагают, что импульс может появиться только в той точке пространства, которая лежит на направлении распространения исходного импульса. Алгоритм, программа и примеры расчетов распространения электромагнитных и акустических импульсов, разработанные по формуле (12), приведены в работах [8-10].

Для неоднородной среды, в которой волновой вектор является функцией координат и задается формулой (3). Выражение (12), описывающее импульс в точке r пространства, отсчитываемого от точки излучения «O» примет вид:

$$\begin{aligned} \bar{p}(r, t) &= \frac{1}{2p} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{S}(O, j\omega) e^{j[\omega t - \bar{k}(j\omega, R) \cdot \bar{r}]} d\omega = \\ &= \frac{1}{2p} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}(O, t) e^{j[(t-t')\omega - \bar{k}(j\omega, R) \cdot \bar{r}]} dt' d\omega. \end{aligned} \quad (15)$$

Тогда выражение (14) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{k}(j\omega, R) \cdot \bar{r} &= k_x(j\omega, R)(x - x_0) + k_y(j\omega, R) \cdot \\ &\cdot (y - y_0) + k_z(j\omega, R)(z - z_0) = \\ &= |\bar{k}(j\omega, R)| |\bar{r}| \cos \beta, \end{aligned} \quad (16)$$

где β – угол между векторами \bar{t} и $\bar{k}(j\omega, R)$.

Выражение (15) в явном и общем виде связывает параметры импульса, появившегося в заданной точке « r » пространства с параметрами импульса, запущенного в точке « O ». Оно определяет каждую координатную составляющую импульса в заданной точке пространства, в частности, для проекций на оси можно записать:

$$\begin{aligned} P_{x,(y),(z)}(r, t) &= \\ &= \frac{1}{2p} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_{x,(y),(z)}(O, t) e^{j[(t-t')\omega - \bar{k}(j\omega, R) \cdot \bar{r}]} d\omega. \end{aligned} \quad (17)$$

С учетом (7)-(9) равенство (15) переписывается в виде:

$$\begin{aligned} \bar{p}(r, t) &= \frac{1}{2p} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}(O, t) e^{-\bar{k}(w, R) \cdot \bar{r}} e^{j[(t-t')\omega - \bar{k}(w, R) \cdot \bar{r}]} dt' d\omega = \\ &= \frac{1}{2p} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}(O, t) e^{-\bar{a}(w, R) \cdot \bar{r}} e^{j\omega \left[(t-t') - \frac{\bar{V}_\Phi(w, R) \cdot \bar{r}}{|\bar{V}_\Phi(w, R)|^2} \right]} dt' d\omega. \end{aligned} \quad (18)$$

Выражение (18) описывает в общем виде распространение импульса в неоднородных поглощающих средах с учетом направленности излучения. При этом (18) пригодно для описания распространения импульса не только в свободном пространстве, но и в волноводной системе, границы которой могут задаваться коэффициентом поглощения среды. Отметим, что параметры r и R связаны между собой через координаты x, y, z по формулам (4) и (16). Если зондирующий импульс находится в начале координат, то $r = R$. В неоднородной среде вектора фазовой скорости и поглощения могут менять направление по координатам [1], поэтому излученный импульс может появиться не только на прямой, определяемой вектором

излучения. Подробный алгоритм расчёта криволинейного движения импульса в стационарной неоднородной среде приведён в работе [14].

Рассмотрим распространение импульса в движущейся среде. Материальным носителем импульсного сигнала является среда, обладающая набором физических свойств, определяющих фазовую скорость и коэффициент поглощения для разных видов энергетических сигналов. Движение среды относительно неподвижного источника излучения, несомненно, повлияет на траекторию перемещения и на характеристики импульса в различных точках направленного распространения.

Действительно, с учетом (8) и (9) выражения (10) можно переписать в виде:

$$\frac{V_\Phi(\omega, R)}{|\bar{V}_\Phi(\omega, R)|^2} = \frac{1}{\pi\omega} \int_m^m \frac{\alpha(v, R)}{v - \omega} dv, \quad (19)$$

$$\alpha(\omega, R) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{v V_\Phi(v, R)}{|\bar{V}_\Phi(v, R)|^2 (v - \omega)} dv. \quad (20)$$

Так как вектор скорости движения среды складывается с вектором фазовой скорости в точках траектории движения, то формируется результирующий вектор фазовой скорости распространения импульсного сигнала

$$V(w, R) = V_\Phi(w, R) + V_0, \quad (21)$$

что согласно преобразованиям Гильберта должно повлиять также на вектор поглощения.

Согласно (20) для коэффициента поглощения движущейся среды можно записать

$$\bar{\alpha}_v(\omega, R) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{v [V_\Phi(v, R) - V_0]}{|\bar{V}_\Phi(v, R) - V_0|^2 (v - \omega)} dv. \quad (22)$$

В целом движение среды изменяет волновой вектор следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{k}'(w, R) &= \frac{w(\bar{V}_\Phi(w, R) + \bar{V}_0)}{|\bar{V}_\Phi(w, R) + \bar{V}_0|^2}; \\ \bar{k}''(w, R) &= \bar{a}_v(w, R); \end{aligned} \quad (23)$$

$$\bar{k}(j\omega, R) = \bar{k}'(w, R) - j\bar{k}''(w, R) = \frac{w(\bar{V}_\Phi(w, R) + \bar{V}_0)}{|\bar{V}_\Phi(w, R) + \bar{V}_0|^2} - j\bar{a}_v(w, R), \quad (24)$$

где $\bar{a}_v(w, R)$ определяется по формуле (20).

Проверим выражение (20) путем следующих заключений.

Если среда однородна, а фазовая скорость равна скорости движения среды, не зависит от частоты и направлена в противоположную сторону, то есть при $\overline{V}_\phi(w, R) = \overline{V}_\phi = -\overline{V}_0$, коэффициент поглощения $\overline{a}_v(w, R) = \infty$.

Это полностью соответствует физическому смыслу, так как скорость распространения импульса полностью компенсируется встречным движением среды, что эквивалентно бесконечно большому коэффициенту поглощения в выбранном направлении.

С учетом (23), (24) выражение, описывающее процесс распространения импульса в движущейся среде, примет вид:

$$\overline{p}(r, t) = \frac{1}{2p} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{p}(O, t) e^{-\overline{a}_v(w, R) \overline{r}} e^{j\overline{w}(t-t) \frac{[\overline{V}_\phi(w, R) + \overline{V}_0] \overline{r}}{|\overline{V}_\phi(w, R) + \overline{V}_0|^2}} dt dw, \quad (25)$$

где $\overline{a}_v(w, R)$ определяется по формуле (20).

Для координатных составляющих вектора (25) можно записать

$$p_{x(y)(z)}(r, t) = \frac{1}{2p} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_{x(y)(z)}(O, t) e^{-\overline{a}_v(w, R) \overline{r}} e^{j\overline{w}(t-t) \frac{[\overline{V}_\phi(w, R) + \overline{V}_0] \overline{r}}{|\overline{V}_\phi(w, R) + \overline{V}_0|^2}} dt dw \quad (26)$$

В однородной среде вектора $\overline{a}_v(w, R) = \overline{a}_v(w), \overline{V}_\phi(w, R) = \overline{V}_\phi(w)$.

В отличие от неподвижных сред, вектор поглощения (22), так же, как и результирующий вектор фазовой скорости (21), не будет коллинеарен с векторами $\overline{p}(O, t), \overline{r}, \overline{p}(r, t)$. Поэтому форма записи для определения характеристик импульсов в отличие от (12) не упрощается и сохранит вид (27):

$$\overline{p}(r, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{p}(O, \tau) e^{-\overline{a}_v(w, R) \overline{r}} e^{j\overline{w}(t-\tau) \frac{[\overline{V}_\phi(w, R) + \overline{V}_0] \overline{r}}{|\overline{V}_\phi(w, R) + \overline{V}_0|^2}} d\tau dw \quad (27)$$

Если вектора $\overline{V}_\phi(w), \overline{V}_0$ коллинеарны, то они будут коллинеарны с вектором $\overline{a}_v(w)$ и выражение (27) примет вид:

$$\overline{p}(r, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{p}(O, \tau) e^{-\overline{a}_v(w, R) \overline{r}} e^{j\overline{w}(t-\tau) \frac{[\overline{V}_\phi(w, R) + \overline{V}_0] \overline{r}}{|\overline{V}_\phi(w, R) + \overline{V}_0|^2}} d\tau dw \quad (28)$$

Рассмотрим более подробно простейший одномерный случай, когда

$\overline{p}(O, t) = \overline{i} p_x(O, t) = p(O, t)$ и вектора фазовой скорости. В этом случае выражение (28) примет вид:

$$p(r, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(O, \tau) e^{-\overline{a}_v(w, R) \overline{r}} e^{j\overline{w}(t-\tau) \frac{[\overline{V}_\phi(w, R) + \overline{V}_0] \overline{r}}{|\overline{V}_\phi(w, R) + \overline{V}_0|^2}} d\tau dw, \quad (29)$$

где коэффициент поглощения определяется по формуле:

$$\overline{a}_v(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{v}{[V_\phi(v) + V_0](v - \omega)} dv, \quad (30)$$

Если фазовая скорость не зависит от частоты $V_\phi(w) = V_\phi$ то выражение (30) примет вид:

$$\overline{a}_v(w) = \frac{1}{p(V_\phi + V_0)} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u}{(u - w)} du = 0, \quad (31)$$

что полностью соответствует действительности, так как единственная среда, в которой фазовая скорость не зависит от частоты, это вакуум. Коэффициент поглощения электромагнитных сигналов в вакууме равен нулю. Акустические сигналы в вакууме принципиально не могут распространяться. Для них фазовая скорость равна нулю, коэффициент затухания равен бесконечности.

Алгоритм расчета распространения импульсов в неоднородных движущихся средах, в которых направление движения импульса отлично от прямолинейного, полностью совпадает с алгоритмом, в котором основные формулы вычислений будут иметь рассмотренные выше поправки на движение среды.

Разработанное математическое описание процесса распространения импульса в движущейся среде не может быть распространено на случай, когда источник импульсов движется относительно неподвижной среды, так как в этом случае меняются координаты точки излучения.

Сигнал, вычисленный по формулам (12), (15), (18), (25) – (29), в общем случае является комплексным:

$$\overline{p}(r, t) = \text{Re}(r, t) + j \text{Im}(r, t). \quad (32)$$

Как указано в [1,2], физический смысл следует придавать действительной части выражения (32). Однако при анализе энергетических характеристик импульса не следует отказываться от мнимой составляю-

шей выражения (32), так как мнимая его часть позволяет по специально разработанным алгоритмам [3] наиболее точно определить время прибытия импульса в контролируруемую точку и его длительность, что чрезвычайно важно для импульсов сложной формы, каковыми они становятся после прохождения среды. Прошедший через среду импульс, изменяет свою форму, скорость и в точке приема несет в себе информацию о свойствах среды или об объекте. При этом важно знать амплитудный спектр принятого импульса, который определяется как прямое преобразование Фурье:

$$\bar{S}(r, j\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}(r, t) e^{-j\omega t} dt = \bar{i}S_x(r, j\omega) + \bar{j}S_y(r, j\omega) + \bar{k}S_z(r, j\omega). \quad (33)$$

Следует отметить, что, как правило, все приемники импульсных сигналов являются координатно-ориентированными, поэтому важно вычислять координатные составляющие прошедшего через среду импульса и соответствующие им амплитудные спектры $S_x(r, j\omega)$, $S_y(r, j\omega)$, $S_z(r, j\omega)$.

Об энергии импульса. Полная энергия W одномерного импульса $p(t)$ согласно равенства Парсеваля определяется по формуле [11]:

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} p^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S_p(j\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |S_p(j\omega)|^2 d\omega. \quad (34)$$

Здесь функция $p(t)$ определяет изменение амплитуды сигнала во времени. Для электрического импульса это может быть ток в [А] или напряжение [В], для электромагнитных импульсов – это составляющие электромагнитного поля – электрическая E [В/м] и магнитная H [А/м], для акустического поля – избыточное давление [Па]. Поэтому выражение (34) следует понимать не как энергию в Джоулях, а как величину, пропорциональную полной энергии, что отмечено в [11]. Чтобы получить энергию в Джоулях, доставленную импульсом в заданную точку, необходимо величину, вычисленную по формуле (38) умножить на параметр, характеризующий свойства среды для конкретного вида импульсного сигнала.

Пределы интегрирования в (34) можно ограничить интервалом $[t_1, t_2]$ реального существования излучающего импульса. Тогда

для векторных сигналов, определенных как (1), (2) выражение для полной энергии излученного в точке O и пришедшего в точку M определяются по формулам:

$$W(O) = \int_{t_{O1}}^{t_{O2}} |\bar{p}(O, t)|^2 dt = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} |\bar{S}(O, j\omega)|^2 d\omega; \quad (35)$$

$$W(r) = \int_{t_{M1}}^{t_{M2}} |\bar{p}(r, t)|^2 dt = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} |\bar{S}(r, j\omega)|^2 d\omega, \quad (36)$$

$t_{O2} - t_{O1} = \Delta t_0$, $t_{M2} - t_{M1} = \Delta t_M$ – интервалы времени реального существования импульсов в точках O и M , соответственно.

Пришедший в заданную точку импульс и соответствующая ему спектральная плотность являются комплексными и векторными величинами:

$$\begin{aligned} \bar{p}(r, t) &= \bar{C}(r, t) + j\bar{D}(r, t) = \\ &= \bar{i}C_x(r, t) + \bar{j}C_y(r, t) + \bar{k}C_z(r, t) + \\ &+ j[\bar{i}D_x(r, t) + \bar{j}D_y(r, t) + \bar{k}D_z(r, t)]; \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \bar{S}(r, j\omega) &= \bar{A}(r, \omega) + \bar{j}B(r, \omega) = \\ &= \bar{i}A_x(r, \omega) + \bar{k}A_z(r, \omega) + \\ &+ j[\bar{i}B_x(r, \omega) + \bar{j}B_y(r, \omega) + \bar{k}B_z(r, \omega)] \end{aligned} \quad (38)$$

Отношение энергий излученного и пришедшего в контролируемую точку импульсов определит суммарное затухание сигнала в заданном направлении. Разность энергий в различных точках движения импульса определяет работу, которую совершил сигнал на линии распространения. Это важно знать при импульсной модификации сред и объектов.

Как известно [1, 2, 5], энергия импульса распространяется не с фазовой, а с групповой скоростью.

Вектор групповой скорости согласно (7) – (9) через фазовую скорость и поглощение определится по формуле:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{gp}(j\omega, R) &= 1 / \frac{\partial k(j\omega, R)}{\partial \omega} = \\ &= A(\omega, R) [\bar{B}(\omega, R) - j\bar{C}(\omega, R)], \end{aligned} \quad (39)$$

$$\text{где } A(\omega, R) = \frac{|\bar{V}_\phi(\omega, R)|}{|\bar{B}(\omega, R)|^2 + |\bar{C}(\omega, R)|^2};$$

$$\bar{B}(\omega, R) = \bar{V}_\phi(\omega, R) - \omega \bar{V}'_\phi(\omega, R);$$

$$\bar{C}(w, R) = \bar{a}'(w, R) \left| \bar{V}_\Phi(w, R) \right|^2.$$

Как видно из (39), групповая скорость распространения импульса есть комплексная величина, мнимая часть которой пропорциональна производной по частоте от вектора поглощения. Отметим, что для частотно независимых непоглощающих сред, которым является только вакуум, из (39) следует, что $\bar{V}_{gp}(w, R) = \bar{V}_\Phi(w, R)$.

Во всех остальных случаях групповая скорость для пассивных сред всегда меньше фазовой.

Если движение импульса рассматривать не как распространение фазовых состояний, а как распространение энергии, то в выражении (18) и в других, вытекающих из него соотношений, вместо фазовой скорости следует подставлять групповую скорость (39).

$$\begin{aligned} \bar{p}(r, t) &= \frac{1}{2p} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}(O, t) e^{-\bar{a}(w, R)r} e^{jw \left[(t-t) - \frac{\bar{V}_{gp}(w, R)r}{|\bar{V}_{gp}(w, R)|^2} \right]} dt dw, = \\ &= \frac{1}{2p} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}(O, t) e^{-[\bar{a}(w, R) + w \frac{\bar{C}(w, R)}{D(w, R)}]r} e^{jw \left[(t-t) - \frac{\bar{B}(w, R)r}{D(w, R)} \right]} dt dw \end{aligned}$$

(40)
где

$$D(w, R) = A(w, R) \left| \bar{B}(w, R) + j\bar{C}(w, R) \right|^2.$$

Это приведет к увеличению амплитудного затухания импульса, так как возрастает показатель первой экспоненты, определяющей затухание сигнала. Известно [1, 2, 12], что импульс есть сгусток энергии, которому можно придать эквивалентную массу. Групповая скорость позволяет это сделать в соответствии с классической формулой энергии движущегося тела:

$$m(w, r) = \frac{W(r)}{\left| \bar{V}_{gp}(w, r) \right|^2}. \quad (41)$$

Из (41) видно, что эквивалентная масса движущегося в неоднородной среде импульса является функцией координат и частоты. Зависимость массы от частоты, казалось бы, исключает механическую трактовку импульса, как сгустка энергии,

что указано в [2]. Однако ничто не мешает трактовать выражение (41) как распределение массы по частотным составляющим импульса, что тем более уместно, если импульс представляет собой пачку, модулированную несущей частотой ω_0 , на которой переносится максимум его энергии. Таким образом, движение импульса в среде теоретически можно представить как движение тела переменной массы с переменной скоростью. Возможно это пригодится при последующих исследованиях распространения импульсов. Как известно [12], электродинамическая теория Максвелла родилась на основе механической модели поля.

Приведенные выражения, определяющие в общем виде форму и местоположение зондирующего импульса, прошедшего через среду, являются математической основой для исследования сред и объектов методом импульсного зондирования. Задавая параметры среды в виде волнового вектора, определяющего коэффициент поглощения и фазовую скорость распространения, с учетом направления излучающего импульса, можно численно моделировать прохождение импульса в пространстве или объекте, наблюдать искажение его формы, определять место и время прибытия в какую-либо точку пространства. Разработанная математическая модель движения импульса в подвижной среде позволяет более точно, чем известными методами, описывать поведение и траекторию движения сигнала в различных ситуациях, в том числе в радиолокации, акустической локации, при исследовании космического пространства. Модель может применяться в приборостроении при исследовании и контроле движущихся сред, в частности в расходомерии жидких и газообразных сред, при контроле показателей качества нефтепродуктов. Дает математическую основу для описания процедуры диагностики, а также импульсной селективной модификации сред и объектов [13].

Библиографический список

1. Гинзбург, В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме [Текст]/ В.Л. Гинзбург. - М.: Наука, 1967. - 684 с.

2. Вайнштейн, Л.А. Распространение импульсов [Текст]/ Л.А. Ванштейн // Успехи физических наук. - 1976. - Т. 118. - Вып. 2. - С. 339-369.
3. Глебович, Г.В. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов [Текст]/ Г.В. Глебович, А.В. Андриянов, Ю.В. Введенский. - М.: Радио и связь, 1984. - 256 с.
4. Бреховских, Л.М. Волны в слоистых средах [Текст]/ Л.М. Бреховских. - М.: Наука, 1973. - 344 с.
5. Никольский, В.В. Электродинамика и распространение радиоволн [Текст]/ В. В. Никольский. - М.: Наука, 1978. - 444 с.
6. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика [Текст]/ Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц // Том VIII. Электродинамика сплошных сред. - М.: Наука, 1982. - 624 с.
7. Красильников, В.А. Введение в физическую акустику [Текст]/ В.А. Красильников, В.В. Крылов. - М.: Наука, 1984. - 428 с.
8. Скворцов, Б.В. Математическое моделирование распространения направленных импульсных сигналов в поглощающих средах [Текст]/ Б.В. Скворцов, М.И. Голикова, Д.А. Скотников // Авиакосмическое приборостроение. - 2010. - №12. - С. 28-32.
9. Скворцов, Б.В. Математическое моделирование и расчет распространения направленных импульсов в однородных средах [Текст]/ Б.В. Скворцов, И.А. Лезин, А.В. Солнцева// Изв. СНЦ РАН. - 2011. - Т. 13. - №6. - С. 41-47.
10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2012610460. Программа моделирования распространения электромагнитных и акустических импульсов в поглощающих средах [Текст]/ Б.В. Скворцов, И.А. Лезин, И.В. Лезина, Д.Б. Скворцов.
11. Гоноровский, И.С., Радиотехнические цепи и сигналы [Текст]/ И.С. Гоноровский. - М.: Радио и связь. 1986 г. - 512 с.
12. Фейнман, Р. Фейнмановские лекции по физике [Текст] / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс // Том 6. Электродинамика. - М.: Мир. - 348 с.
13. Скворцов, Б.В. Постановка задачи импульсной селективной модификации среды [Текст]/ Б.В. Скворцов, М.И. Голикова, Д.А. Скотников // Известия Самарского научного центра РАН. - 2011. - Т. 13, №4, С. 117-119.
14. Скворцов, Б.В. Математическое моделирование и расчет распространения направленных импульсов в неоднородных поглощающих средах [Текст] / Б.В. Скворцов, Д.Б. Скворцов, А.Н. Малышева-Стройкова // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». - 2012. Т. 1(33). - С. 66-73.

THEORETICAL BASIS OF DIRECTED ENERGY TRANSMISSION PULSES IN STATIONARY AND MOVING MEDIA

©2012 B. V. Skvortsov, D. B. Skvortsov, A. N. Malysheva – Strojko

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

The work is described mathematically by an energy field created by emitting a pulse as it propagates in an inhomogeneous absorbing medium. We give a three-dimensional mathematical description of the algorithm and the propagation of pulse signals sent in inhomogeneous absorbing stationary and moving media. Determined by the pulse energy and the group velocity. Changing the amplitude and spectral composition of the pulse passing through the medium under investigation provides diagnostic information about the environment.

The directional momentum of the wave vector, inhomogeneous medium, the absorption coefficient, the phase velocity, the mathematical description of the algorithm calculating the energy.

Информация об авторах

Скворцов Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры электротехники, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва. E-mail: aps@ssau.ru. Область научных интересов: распространение электромагнитных волн в различных средах.

Скворцов Дмитрий Борисович, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва. E-mail: aps@ssau.ru. Область научных интересов: распространение электромагнитных волн в различных средах.

Малышева-Стройкова Александра Николаевна, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва. E-mail: aps@ssau.ru. Область научных интересов: распространение электромагнитных волн в различных средах.

Boris Skvortsov Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor of electrical engineering, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov. E-mail: aps@ssau.ru. Area of scientific: the propagation of electromagnetic waves in a variety of environments.

Skvortsov Dmitry Borisovich, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov. E-mail: aps@ssau.ru. Area of scientific: the propagation of electromagnetic waves in a variety of environments.

Malysheva-Stroykova Alexandra Nikolaevna, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov. E-mail: aps@ssau.ru. Area of scientific: the propagation of electromagnetic waves in a variety of environments.

УДК 621.396.72+621.382.049.77

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

© 2012 Г. Н. Князева, Г. Ф. Краснощёкова, С. В. Тюлевин

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

В работе представлены тепловые модели различных тепловыделяющих компонентов, которые различными способами крепятся к плате и дан расчёт их эквивалентных тепловых сопротивлений. Кроме того, обращается внимание на расчёт толщины теплопроводящей пасты при анализе тепловых сопротивлений. Показано, что толщина слоя пасты зависит от зазора между контактирующими поверхностями.

Тепловой расчёт, тепловая модель, тепловая схема, тепловое сопротивление.

Изделия электронной техники стремительно миниатюризируются. С увеличением функциональной плотности интегральных микросхем (ИМС) размеры проводящих дорожек уменьшаются, что приводит к увеличению плотности тока, увеличению доли отказов ИМС в изделиях, особенно при нарушении температурных режимов [1, 2].

Микросхемы высокой степени интеграции не всегда надёжны и стабильны, поэтому необходимо решать задачи отвода тепла от работающих изделий, обеспечивать неразрушение внутренних контактов интегральных схем при технологическом воздействии и испытаниях. Эти требования к разработке методов приводят к изменению методов конструирования, обеспечивающих нормальный тепловой режим.

В настоящее время всё большее распространение получают конструкции устройств, состоящие из скреплённых между собой ячеек, установленных на общем основании, а основание, в свою очередь, соединяется с термоплатой с применением теплопроводящей пасты. С помощью термоплаты производится отвод тепла от ячеек.

Задачей данной статьи является разработка и анализ тепловых моделей для расчёта и оценки эффективности теплоотвода конструкции. Для этого определяются температуры тепловыделяющих элементов при наиболее жёстком температурном режиме,

когда максимальная температура термоплаты не должна превышать 40°C .

Тепловой расчёт производится методом тепловых сопротивлений. Участки тепловой цепи, представляющие собой тепловые сопротивления, в свою очередь эквивалентны электрическим сопротивлениям, тепловая мощность эквивалентна электрическому току, а температура в точках цепи – электрическому потенциалу.

Представим несколько тепловых моделей тепловыделяющих элементов:

1. Чип-резистор.

Тепловая модель чип-резистора и ее эквивалентная схема приведены на рис. 1, 2.

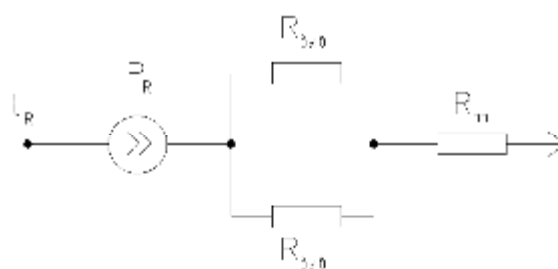


Рис. 1. Тепловая модель чип-резистора

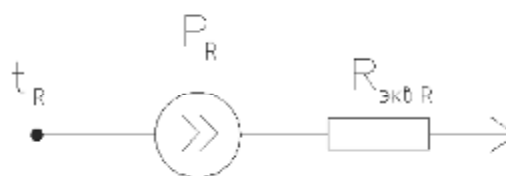


Рис. 2. Эквивалентная схема чип-резистора

На рис. 1, 2: t_R – температура корпуса резистора, К; $R_{\text{выв}}$ – тепловое сопротивление вывода резистора, К/Вт; $R_{\text{пт}}$ – тепловое сопротивление печатной платы под резистором, К/Вт; $R_{\text{эквR}}$ – эквивалентное тепловое сопротивление, К/Вт; P_R – мощность, рассеиваемая резистором, Вт.

Согласно схемы можно найти $R_{\text{эквR}}$:

$$R_{\text{эквR}} = \frac{R_{\text{выв}}}{2} + R_{\text{пт}} =$$

$$= \frac{1}{2S_R} \left(\frac{h_{\text{припоя}}}{\lambda_{\text{припоя}}} + \frac{h_{\text{пт}}}{\lambda_{\text{пт}}} \right), \quad (1)$$

где $h_{\text{припоя}}$ – толщина слоя припоя; $\lambda_{\text{припоя}}$, $\lambda_{\text{пт}}$ – соответственно теплопроводности припоя и материала печатной платы; S_R – площадь контактной площадки резистора.

2. Резисторная сборка.

Тепловая модель резисторной сборки, установленной на печатную плату и её эквивалентная схема приведены на рис. 3 и 4.

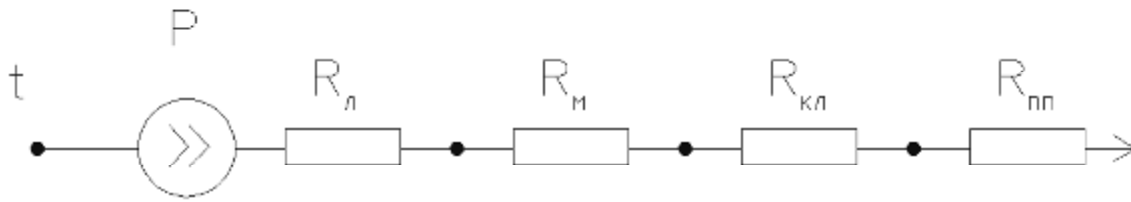


Рис. 3. Тепловая схема резисторной сборки

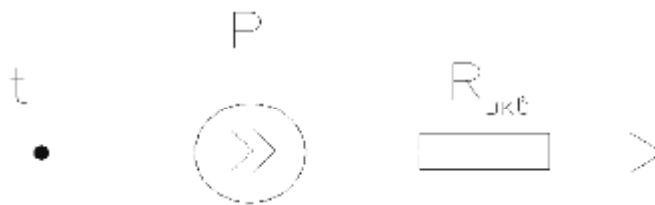


Рис. 4. Эквивалентная схема резисторной сборки

Здесь t – температура корпуса радиоэлемента;
 P – мощность, рассеиваемая элементом;
 $R_{\text{л}}$ – тепловое сопротивление лакоткани;
 $R_{\text{м}}$ – тепловое сопротивление мастики;
 $R_{\text{кл}}$ – тепловое сопротивление клея;
 $R_{\text{пт}}$ – тепловое сопротивление печатной платы;
 $R_{\text{экв}}$ – эквивалентное тепловое сопротивление.

Для этого случая:

$$R_{\text{экв}} = R_{\text{л}} \parallel R_{\text{м}} \parallel R_{\text{кл}} \parallel R_{\text{пт}} - \frac{1}{2S} \left(\frac{h_{\text{л}}}{\lambda_{\text{л}}} + \frac{h_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}} + \frac{h_{\text{кл}}}{\lambda_{\text{кл}}} + \frac{h_{\text{пт}}}{\lambda_{\text{пт}}} \right), \quad (2)$$

где S – площадь под корпусом радиоэлемента,
 $\lambda_{\text{л}}$, $\lambda_{\text{м}}$, $\lambda_{\text{кл}}$, $\lambda_{\text{пт}}$ – теплопроводности лакоткани, мастики, клея, печатной платы,
 $h_{\text{л}}$, $h_{\text{м}}$, $h_{\text{кл}}$, $h_{\text{пт}}$ – толщины слоев лакоткани, мастики, клея, печатной платы.

Если резисторы, микросхемы, диоды установлены на печатной плате с помощью припоя, то тепловая схема будет иметь вид, приведённый на рис. 5.

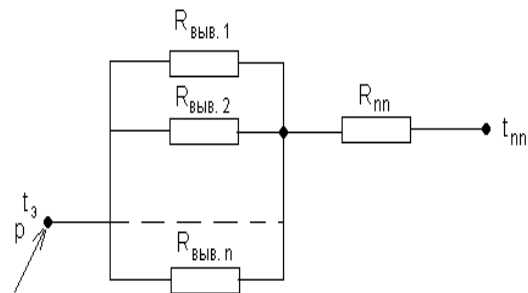


Рис. 5. Тепловая схема 1

Здесь t_3 – температура элемента,
 P – мощность рассеяния радиоэлемента;
 $R_{\text{вывi}}$ – тепловое сопротивление припоя под выводами элемента;
 $R_{\text{пт}}$ – тепловое сопротивление печатной платы.

Для такого случая монтажа общее эквивалентное тепловое сопротивление определится формулой

$$R_t = \frac{R_{\text{выв}}}{N} + R_{\text{пт}}, \quad (3)$$

где N – число выводов радиоэлемента.

Если радиоэлементы дополнительно приклеиваются к печатной плате, то тепловую схему можно представить следующим образом (рис. 6).

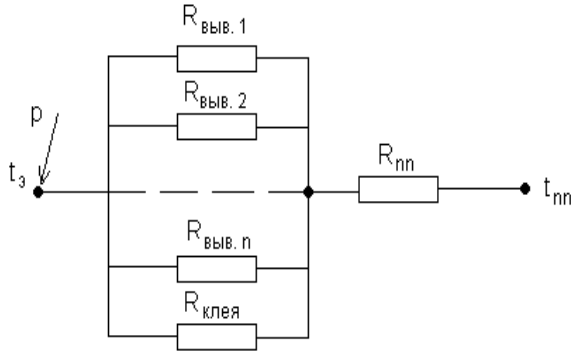


Рис. 6. Тепловая схема 2

Здесь t_3 – температура радиоэлемента,

$R_{\text{выв}i}$ – тепловое сопротивление припоя под вывод;

P – мощность рассеяние элемента;

$R_{\text{клея}}$ – тепловое сопротивление слоя клея;

$R_{\text{пт}}$ – тепловое сопротивление печатной платы.

Для такого случая монтажа эквивалентное сопротивление может быть найдено с помощью следующего выражения:

$$R_t = \frac{\frac{R_{\text{выв}}}{N} R_{\text{клея}}}{\frac{R_{\text{выв}}}{N} + R_{\text{клея}}} + R_{\text{пт}}. \quad (4)$$

Чаще всего, особенно для жёстких условий эксплуатации, радиоэлементы с выводами, сформованными под поверхностный монтаж, обязательно устанавливаются с помощью клея.

Основным вопросом при расчете теплового сопротивления теплопроводящей пасты является определение её толщины. Она будет иметь разную толщину из-за величины зазоров между контактируемыми поверхностями, который складывается из допусков на неплоскостность между контактируемыми поверхностями. Обычно допуск на эту величину не задаётся при разработке и часто его

берут равным допуску на габаритный размер и тогда тепловое сопротивление теплопроводящей пасты и основания можно определить по следующим формулам:

$$R_{\text{пасты}} = \frac{T_{\text{осн}}}{\lambda_n S_{\text{осн}}}, \quad (5)$$

$$R_{\text{осн}} = \frac{h_{\text{осн}}}{\lambda_{\text{осн}} S_{\text{осн}}}, \quad (6)$$

где $T_{\text{осн}}$ – допуск на неплоскостность, λ_n – теплопроводность теплопроводящей пасты, $S_{\text{осн}}$ – площадь основания.

Если температуры тепловыделяющих радиоэлементов превышают допустимые по ТУ, требуется уточнение моделей.

Данные модели более полно отражают детали рассматриваемого процесса. Степень соответствия модели реальным процессам определяет точность получаемых при регулировании результатов и зависит от полноты учёта существенных сторон моделируемых процессов.

В работе нагретая зона РЭС представлена как неоднородная система многих тел, идеализирующаяся в виде однородного тела. Свойства этого тела характеризуются эффективными значениями теплофизических параметров: коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$ и теплоёмкости $C_{\text{экв}}$, т.е. это анизотропные тела с распределёнными по объёму источниками энергии.

В работе для расчёта температурного поля конструкция делится на укрупнённые элементарные ячейки. Анализ этой модели показывает, что в многокомпонентной структуре температурное поле неравномерно, т.е. необходимо перейти к решению задачи управления-перемещения дискретных элементов по сети.

Применение моделирования тепловых полей на основе предложенной методики позволило наметить новые пути к управлению перемещением дискретных элементов с целью получения равномерного температурного поля, что дало возможность исключить влияние температурного фона на режим работы элементов. Кроме того, следует отметить всевозрастающую роль принципа взаимосвязи задач, включаемых для решения проблем конструирования надёжных РЭС.

Библиографический список

1. Зеленский, А.В. Электронные средства. Конструкции и расчетные модели: учебное пособие [Текст]/ А.В. Зеленский, Г.Ф. Краснощекова. – Самара: Изд-во СГАУ, 2010. – 152 с.
2. Медведев, А.М. Сборка и монтаж электронной аппаратуры [Текст]/ А.М. Медведев. – М.: Техносфера, 2007. – 208 с.

ANALYSIS OF MODELS OF FUEL ELEMENTS WHILE USING OF SURFACE MOUNTING

© 2012 G. N. Knyazeva, G. F. Krasnoshchekova, S. V. Tyulevin

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

This paper presents the thermal models of different fuel components that are attached in various ways to the board and calculations of their heat resistance are given below. Also in the analysis of the thermal resistances a great attention is given to the calculation of the thickness of thermal paste. It is shown that the thickness of the paste layer depends on the gap between the contacting surfaces.

Thermal design, thermal model, the thermal circuit, the thermal resistance.

Информация об авторах:

Краснощёкова Галина Федоровна, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kipres@ssau.ru. Область научных интересов: моделирование процессов в РЭС.

Князева Галина Николаевна, магистрант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kipres@ssau.ru. Область научных интересов: надёжность и качество радиоэлектронных средств.

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

Krasnoshchekova Galina Fedorovna, candidate of technical sciences, assistant professor of design and production radio-electronic means, Samara State Aerospace University named after S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kipres@ssau.ru. Area of scientific: modeling of the electronic equipment.

Knyazeva Galina Nikolaevna, under-graduate student of design and production radio-electronic means, Samara State Aerospace University named after S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kipres@ssau.ru. Area of scientific: the quality and reliability of electronic equipment.

Tyulevin Sergei Viktorovich, candidate of technical sciences, assistant professor of design and production radio-electronic means, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kipres@ssau.ru. Area of scientific: quality and reliability of space-based radioelectronic means.

УДК 621.382

УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ СТАБИЛИТРОНОВ

© 2012 С. В. Тюлевин, И. Н. Козлова, Г. П. Шопин, А. И. Архипов

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

В статье описано устройство контроля, позволяющее производить отбраковку двуханодных стабилитронов. Предлагаемое устройство имеет высокую точность и достоверность контроля. Устройство позволяет задавать различные скорости изменения выходного тока двухполярного генератора пилообразного тока.

Контроль качества, отбраковка, устройство, двуханодный стабилитрон.

Контроль качества выпускаемой электронной промышленностью элементной базы является актуальной задачей, которая возникает при производстве радиоэлектронной аппаратуры [1 - 3]. Особую остроту вызывает процесс контроля качества стабилитронов. Известные устройства контроля полупроводниковых стабилитронов имеет низкую точность, что снижает эффективность и достоверность отбраковки некачественных образцов.

Цель данной работы – повышение точности и достоверности контроля и отбраковки двуханодных стабилитронов. Для повышения точности и достоверности контроля и отбраковки стабилитронов было разработано устройство, блок-схема которого приведена на рис. 1.

Устройство содержит элемент И1, двухпороговый компаратор 2, первый источник опорного напряжения 3, двухполярный генератор пилообразного тока 4, испытуемый двуханодный стабилитрон 5, второй источник опорного напряжения 6, первый блок выделения абсолютного значения напряжения 7, компаратор 8, третий источник опорного напряжения 9, сглаживающий фильтр 10, второй блок выделения абсолютного значения напряжения 11 и дифференцирующее устройство 12.

Устройство работает следующим образом. Генератор пилообразного тока 4 (на основе последовательно соединенных

генератора прямоугольных импульсов, элемента И и счетчика, а также ЦАП, источника тока, сумматора тока и усилителя тока) формирует двухполярный пилообразный сигнал, который поступает на первый анод испытуемого двуханодного стабилитрона 5. Его второй анод подключен к земле.

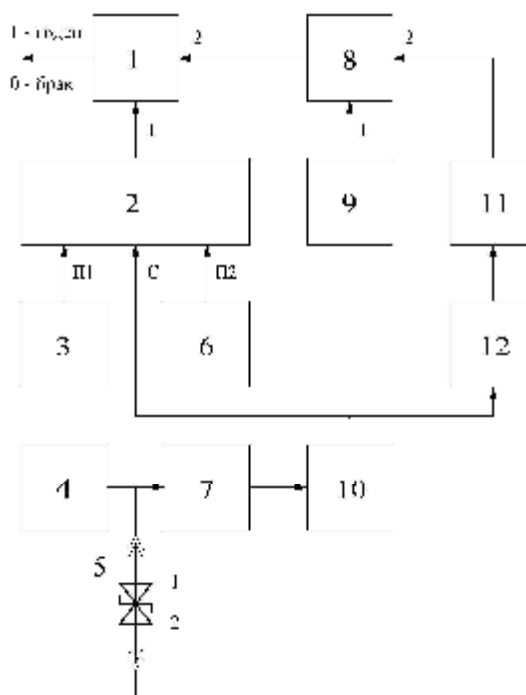


Рис. 1. Блок - схема устройства для отбраковки двуханодных стабилитронов

Первоначально генератор тока 4 формирует во времени отрицательный ток, начиная с заданного значения I_{\max} , линейно убывающий по модулю (рис. 2).

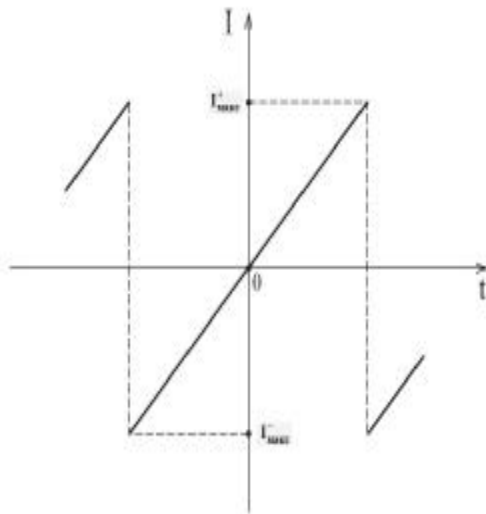


Рис. 2. Временная диаграмма работы двухполярного генератора пилообразного тока

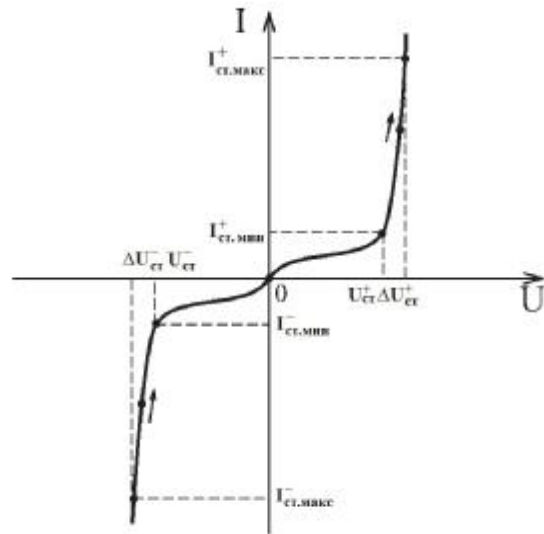


Рис. 3. Вольт – амперная характеристика двуханодного стабилизатора

В этом случае первый стабилизатор двуханодного стабилизатора 5 работает как стабилизатор на обратном участке, а второй – как диод на прямом участке ВАХ. При таком изменении тока, текущего через двуханодный стабилизатор 5, его рабочая точка (рис. 3) будет «двигаться» от максимального $I_{ст.макс}$ до минимального $I_{ст.мин}$ тока стабилизации ВАХ, образованной сложением указанных характеристик первого и второго стабилизаторов. При этом на стабилизаторе 5 будет поддерживаться практически постоянное (отрицательное) напряжение стабилизации $U_{ст}$.

В дальнейшем уменьшение тока от $I_{ст.мин}$ до нуля приведет к срыву режима стабилизации стабилизатора 5 и уменьшению напряжения на нем до нуля (рис. 4, а). Затем генератор тока 4 формирует во времени положительный, начиная с нуля, линейно возрастающий ток (рис. 2), который по достижению определенного уровня приводит к возникновению режима стабилизации стабилизатора 5. В этом случае второй стабилизатор двуханодного стабилизатора 5 работает как стабилизатор на обратном участке, а первый – как диод на прямом участке ВАХ. При таком изменении тока, текущего через двуханодный стабилизатор 5, его рабочая

точка (рис. 3) будет «двигаться» от минимального ($I_{ст.мин}$) до максимального ($I_{ст.макс}$) тока стабилизации ВАХ, образованной сложением указанных характеристик первого и второго стабилизаторов. При этом на стабилизаторе 5 будет поддерживаться практически постоянное (положительное) напряжение стабилизации ($U_{ст}^+$). Следует отметить, что и $I_{ст.мин}$ и $I_{ст.макс}$, $I_{ст.мин}^+$ и $I_{ст.макс}^+$, а также $U_{ст}^-$ и $U_{ст}^+$ у исправных двуханодных стабилизаторов соответственно практически одинаковы и отличаются во втором – третьем знаке после запятой.

Таким образом, в режиме стабилизации двуханодного стабилизатора 5 на нем, в зависимости от направления входного тока, формируется положительное ($U_{ст}^+$) или отрицательное ($U_{ст}$) напряжение стабилизации (рис. 4, а). Первый блок выделения абсолютного значения напряжения 7, сохраняя численное значение, приводит его на своем выходе к одному (положительному) знаку (рис. 4, б). Для того, чтобы ток с выхода генератора 4 практически полностью поступал на двуханодный стабилизатор 5, необходимо обеспечить большое входное сопротивление первого блока выделения абсолютного значения напряжения 7.

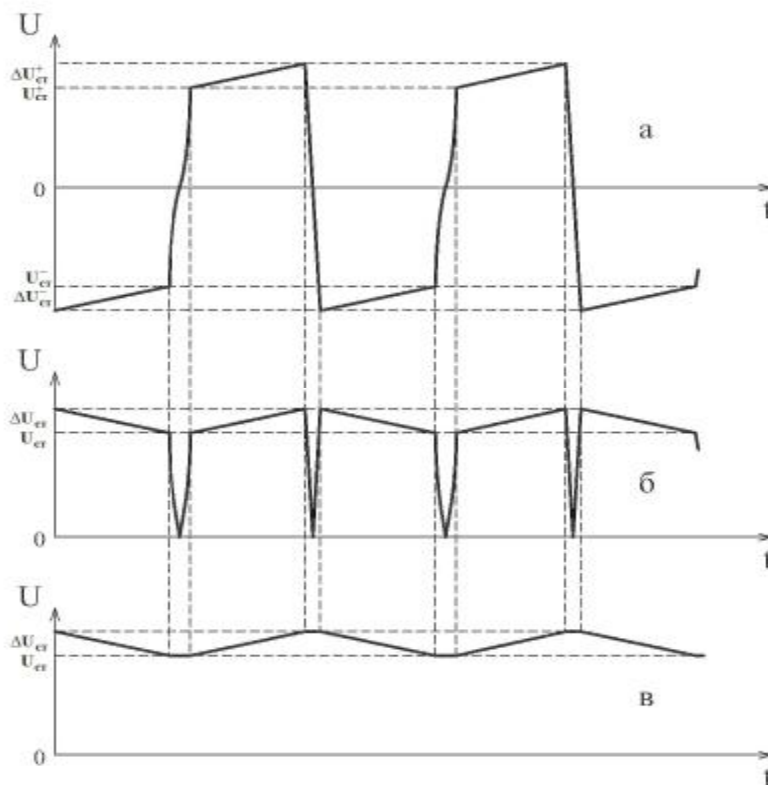


Рис. 4. Эпюры, поясняющие принцип работы устройства для отбраковки двуханодных стабилизаторов: а – эпюры напряжения на двуханодном стабилизаторе, б – эпюры напряжения на выходе первого блока выделения абсолютного значения напряжения, в – эпюры напряжения на выходе сглаживающего фильтра

Сглаживающий фильтр 10 устраняет скачки напряжения, вызванные срывом режима стабилизации при смене полярности выходного тока двухполярного генератора пилообразного тока 4 как при линейном, так и при скачкообразном изменении тока (рис. 4, в). Напряжение с выхода сглаживающего фильтра 10 поступает на сигнальный вход С двухпорогового компаратора 2 и вход дифференцирующего устройства 12.

В силу отличий одного двуханодного стабилизатора от другого, зафиксированное напряжение стабилизации ($U_{ст}$) будет иметь некоторый разброс. Нижняя граница области допустимых значений задается выходным напряжением первого источника опорного напряжения 3, верхняя – выходным напряжением второго источника опорного напряжения 6. Эти напряжения поступают соответственно на первый П1 и второй П2 пороговые входы двухпорогового компаратора 2.

Если напряжение стабилизации лежит в заданном поле допуска, то на выходе двухпорогового компаратора 2 формируется логическая «1», в противном случае – логический «0».

Наличие логической «1» на выходе двухпорогового компаратора 2 позволяет говорить об исправности испытуемого двуханодного стабилизатора 5, а наличие логического «0» – о его дефектном состоянии по критерию нормы напряжения стабилизации.

На выходе дифференцирующего устройства 12 формируется напряжение, пропорциональное первой производной по времени выходного напряжения сглаживающего фильтра 10, которое несет информацию об изменении напряжения стабилизации ($\Delta U_{ст}$) на ВАХ (рис. 4, в).

Так как при смене полярности (направления) тока генератора 4 от минуса к плюсу имеет место переход от спада к росту напряжения стабилизации (рис. 4, в), будет меняться знак первой

производной. При этом выходное напряжение дифференцирующего устройства 12 изменит свою полярность. Второй блок выделения абсолютного значения напряжения 11, сохраняя численное значение, приводит его на своем выходе к одному (положительному) знаку. Компаратор 8 сравнивает выходные напряжения второго блока выделения абсолютного значения напряжения 11 и третьего источника опорного напряжения 9. Последнее пропорционально численному значению аналогичной производной заведомо качественного двуханодного стабилитрона.

Если выходное напряжение второго блока выделения абсолютного значения напряжения 11 не превышает выходного напряжения третьего источника опорного напряжения 9, на выходе компаратора 8 формируется логическая «1», в противном случае – логический «0».

Наличие логической «1» на выходе компаратора 8 позволяет говорить об исправности испытуемого двуханодного стабилитрона 5, а наличие логического «0» - о его дефектном состоянии по критерию нормы изменения напряжения стабилизации (ΔU_{cm}).

Таким образом, наличие логической «1» на выходе элемента *И1* позволяет говорить об исправности испытуемого двуханодного стабилитрона 5, а наличие логического «0» - о его дефектном состоянии одновременно по двум критериям нормы напряжения стабилизации (U_{cm}) и нормы изменения напряжения стабилизации (ΔU_{cm}).

Преимуществами устройства по сравнению с прототипом являются повышенные точность и достоверность,

которые достигаются путем проведения отбраковки каждого из стабилитронов, входящих в двуханодный стабилитрон, как по напряжению стабилизации, так и по его изменению.

Кроме того, устройство позволяет проводить динамическую отбраковку двуханодных стабилитронов, задавая различные скорости изменения выходного тока двухполярного генератора пилообразного тока 4.

Библиографический список

1. Архипов, А.В. Электрофизическая диагностика микросхем серии 765 [Текст]/ А.В. Архипов, М.Н. Пиганов, С.В. Тюлевин, А.И. Архипов // Тезисы докл. XIX ВНТК по неразрушающему контролю и технической диагностике, Самара, СГАУ, 6 - 8 сентября 2011г. –М.: Изд. дом “Спектр”, 2011. – С.448-450.

2. Бараненко, Р.В. Технические аспекты проектирования многоканального устройства для контроля параметров полупроводниковых приборов [Текст]/Р.В. Бараненко // Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и на транспорте: матер. междунар. н. пр. конф. –Украина, Одесса, 2012. –Т.5. – Вып.2. – С.54-56.

3. Пиганов, М.Н. Пат. 2445640. Российская Федерация, МПК G01R 31/26. Устройство для отбраковки двуханодных стабилитронов [Текст]/ М.Н. Пиганов, Г.П. Шопин, С.В. Тюлевин, И.Н. Козлова; заявитель и патентообладатель: Самарский государственный аэрокосмический университет. – № 2010140421/28; заявл. 01.10.2010, опубл. 20.03.012. Бюлл. №8. - 8 с.

CONTROL DEVICE ZENER DIODE

© 2012 S. V. Tyulevin, I. N. Kozlova, G. P. Shopin, A. I. Arkhipov

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

The article describes a device control, allowing to make culling dual-anode diodes. The proposed device has a high accuracy and reliability of the control. The device allows to set different rates of change of the output voltage bipolar voltage ramp generator.

Quality control, culling, device, dual-anode stabilatron.

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

Козлова Ирина Николаевна, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kipres@ssau.ru. Область научных интересов: испытания электронных узлов космической аппаратуры.

Шопин Геннадий Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: mirtea@ya.ru. Область научных интересов: моделирование процессов в РЭС.

Архипов Александр Иванович, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kipres@ssau.ru. Область научных интересов: испытания электронных узлов космической аппаратуры.

Tyulevin Sergei Viktorovich, candidate of technical sciences, assistant professor of design and production radio-electronic means, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kipres@ssau.ru. Area of scientific: quality and reliability of space-based radioelectronic means.

Kozlova Irina Nikolaevna, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician Korolyov (national research universities). E-mail: kipres@ssau.ru. Area of scientific: the testing of electronic components of spacecraft.

Shopin Gennady Pavlovich, assistant professor of electronic systems and devices, Samara State Aerospace University named after academician Korolyov (National Research University). E-mail: mirtea@ya.ru. Area of scientific: modeling of processes in the RES.

Arkhipov Alexander Ivanovich, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician Korolyov (national research universities). E-mail: kipres@ssau.ru. Area of scientific: the testing of electronic components of spacecraft.

ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ТЕПЛОВИЗОРА СОХ СХ – 320U

© 2012 И. Е. Давыдов, А. Н. Агафонов

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

Рассмотрена разработка тепловизионного медицинского аппаратно-программного комплекса. Представлены основные характеристики, основные окна программы и ее возможности. Рассмотрены перспективы развития разрабатываемого комплекса.

Томография, тепловизионная система, тепловизионная диагностика, программа, характеристики.

Первое упоминание о медицинской томографии относится к 1956 году, когда канадский ученый Роберт Лаусон опубликовал свои исследования по теме «Значения поверхностных температур в диагностике рака молочной железы». В данной работе был описан первый опыт применения в американской армии рассекреченных ИК-эвапорографов «Бэрд» и «Рекси» для диагностики медицинской патологии.

Тепловизионные исследования в нашей стране впервые были начаты в начале 60-х годов М.А. Собакиным, М.М. Мирошниковым и их сотрудниками в Государственном оптическом институте (ГОИ) им. С.И. Вавилова [1].

На протяжении всего времени своего существования тепловизионная медицинская техника постоянно совершенствуется. Так, если с помощью первых инфракрасных (ИК) приборов была возможна преимущественно качественная оценка тепловой картины, а количественная сводилась к измерению относительной разницы температур между симметричными участками, то последующие модели стали оснащаться внешним эталоном температуры для оценки (с определенной погрешностью) абсолютных значений температуры объекта. В современных тепловизионных системах информация выводится на экран монитора и при необходимости может

быть занесена в память компьютера или распечатана на принтере. Сочетание высокой разрешающей способности по пространству и чувствительности по температуре сделало возможным детальное изучение тепловой картины объекта. Реализованы и новые возможности обработки информации [2].

Среди отечественных сертифицированных медицинских тепловизионных систем широкое распространение (с 1995 по 2010 гг.) получила система на базе тепловизора ТВ-04 Кст (г. Кстово), в модернизации и доработке системы с 2005 года принимали участие специалисты СГАУ (НИЛ-38).

Тепловизор ТВ-04 относился к «нулевому поколению» тепловизионной техники, основанной на применении единичных охлаждаемых приёмников и двумерной (строчной и кадровой) развёртки с помощью сканирующей оптико-механической системы. Отсутствие современных конкурентоспособных отечественных разработок в области неохлаждаемых микроболометров привело к переориентации на ИК-модули импортного производства.

Для сохранения имеющегося научного задела в области медицинской тепловизионной техники (разработка ИК-систем, программного обеспечения и медицинских методик по термографии),

учитывая ситуацию с отечественными ИК-модулями, а также имеющимся большим опытом в разработке медицинского программного обеспечения ИК-камер, возникла необходимость в разработке ИК-систем на базе шведского тепловизора Flir A320, а в дальнейшем на базе южнокорейского тепловизора COX CX-320U (рис.1.).



Рис. 1. Медицинский тепловизионный аппаратно-программный комплекс, на базе тепловизора Flir A320 (COX CX-320U)

Отличительными особенностями аппаратной части системы, на базе тепловизора COX CX-320U, являются:

- малые массогабаритные характеристики (0,63 кг; (ДхШхВ) – 183 x 77,6 x 67,6 мм);
- температурная чувствительность – 80 мК при +30 °С;
- частота смены кадров – 60 Гц;
- тип детектора – матрица в фокальной плоскости (ФРА), неохлаждаемый микро-болометр;
- спектральный диапазон – 7,5–14 мкм;
- разрешение – 384 x 288 пикселей;
- температурный диапазон — от –20 °С до +100 °С, от 0 °С до +500°С (погрешность – ±2 °С или 2 % от показаний).

Рабочая температура комплекса находится в диапазоне от –15 °С до +50°С.

При разработке программной части комплекса были реализованы следующие алгоритмы настройки отображения теплового поля объекта (термограммы):

- применение основных медицинских палитр;

- автоматическая подстройка диапазона температур;
- улучшение изображения, коррекция неоднородности изображения;
- коррекция температурного дрейфа;
- инструменты анализа (термопрофиль, изотерма, периодическая съёмка, серия).

Помимо применённых алгоритмов, была необходимость применения дополнительной обработки изображения, т.к. получаемый сигнал не соответствует критериям качества, необходимым для проведения достоверного анализа [3]. Другое направление в разработке программной части комплекса было связано с тем, что диагносту (оператору) необходимо видеть на экране все основные окна и клавиши управления (окна визуализации, диагноза, списка термограмм и т.д.). Принятый подход к разработке программного продукта позволил адаптировать аппаратно-программный комплекс к требованиям врачей при проведении тепловизионной диагностики (рис. 2).

Окно программы содержит: заголовки программы; главное меню программы; окна визуализации изображения; блок «Управление камерой»; блок «Управление изображением»; блок режимов («Периодическая съёмка», «Время», «Термопрофиль», «Изотерма»); окно отображения «Диагноз»; окно списка пациентов; окно списка термограмм выбранного пациента.

В разработанной версии программы был реализован пользовательский интерфейс с двумя окнами визуализации термограмм, это связано с обязательными требованиями к проведению медицинской тепловизионной диагностики, в частности:

- просмотр одной и той же термограммы в разных цветовых палитрах, в разных температурных диапазонах, в разных временных диапазонах;
- сравнительный анализ двух логически связанных друг с другом термограмм.

Окна визуализации активны

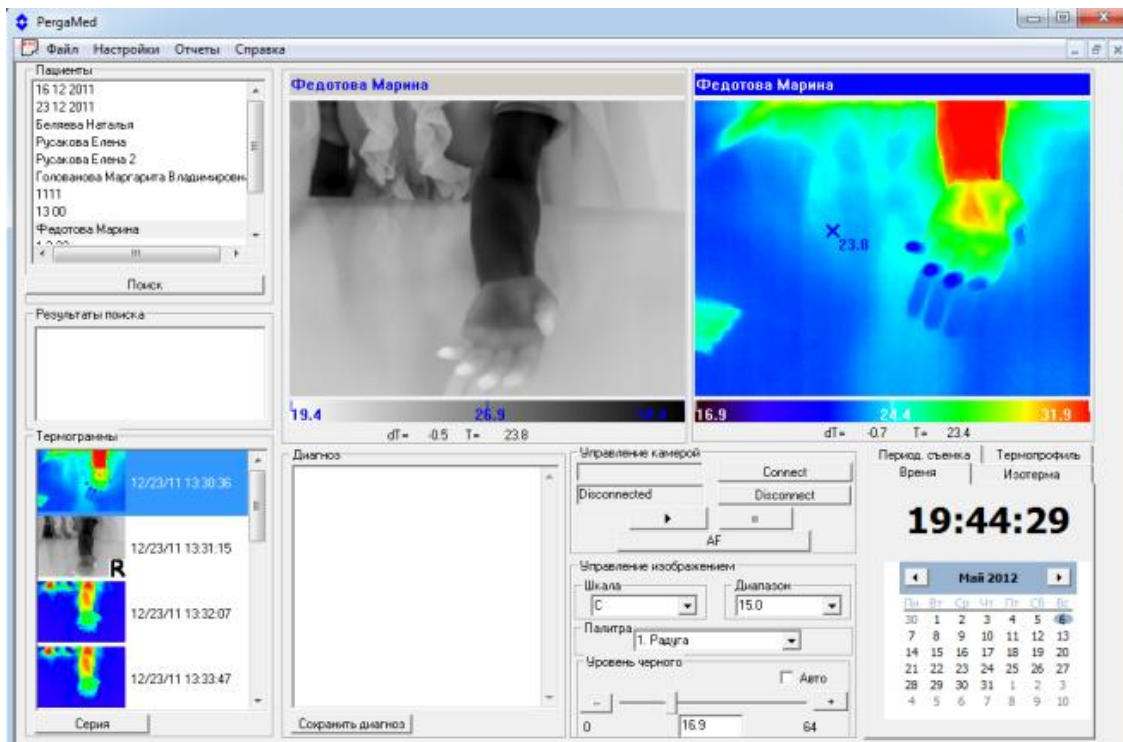


Рис. 2. Главное окно программы

попеременно – как в режиме сканирования, так и в режиме обработки термограмм. Программа содержит необходимый набор операций для визуализации и обработки изображений.

Блок режимов представлен четырьмя режимами: «Периодическая съёмка», «Изотерма», «Термопрофиль» и «Часы». Переключение между режимами осуществляется нажатием левой клавиши манипулятора «мышь» на соответствующей вкладке (названии) режима. Режим «Периодическая съёмка» предоставляет возможность исследовать динамику тепловых полей пациента посредством формирования серии тепловизионных кадров с заданным межкадровым интервалом без участия оператора (врача-диагноста). В режиме «Изотерма» программа позволяет выделить цветом область термограммы, соответствующую выбираемому интервалу температуры, режим применим для обоих окон визуализации. В режиме «Термопрофиль» программа строит термопрофили. Блок «Часы» предназначен для визуального контроля врачом (оператором) даты и времени проведения сеанса.

Блоки «Управление камерой» и

«Управление изображением» позволяют обеспечивать соединение с ИК-камерой и осуществлять корректировку термограмм.

По результатам проведённых исследований на аппаратно-программном комплексе проводится обработка результатов, на основании которых врач (оператор) принимает решение о постановке диагноза.

В качестве примера работы аппаратно-программного комплекса представлены результаты визуализации изображения варикозного расширения вен нижних конечностей (рис.3.).



Рис. 3. Термографические признаки варикозного расширения вен нижних конечностей

В настоящий момент получены следующие основные результаты:

1. Разработан медицинский тепловизионный аппаратно–программный комплекс.

2. Проведена апробация разработанного комплекса в медицинских центрах Москвы, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода.

3. Проведённые работы по созданию аппаратно-программного комплекса на базе тепловизора СОХ СХ-320U являются основой для разработки новых систем:

- аппаратно-программного комплекса «Дистанционный температурный эпидемиологический контроль». Данный комплекс предназначен для обеспечения автоматизированного дистанционного неинвазивного контроля температур биологических объектов в движущемся потоке (аэропорты, вокзалы, производственные объекты, школы и т.п.), посредством одновременного (синхронного) управления тепловизором и видеокамерой в процессе приёма, визуализации, обработки изображений и сохранения видеофайлов в ИК и видимом диапазонах;
- аппаратно-программного комп-

лекса «Дистанционный контроль объектов, на базе оптико-электронного гиостабилизированного комплекса», предназначенного для одновременного (синхронного) управления с летательного аппарата ИК-, видео-камерами при обеспечении автоматизированного дистанционного неинвазивного (скрытого) контроля объектов, с последующей привязкой данных к координатам местности.

Библиографический список

1. Колесов, С.Н. Медицинское теплорадиовидение: современный методологический подход [Текст]/ М.Г. Воловик, М.А. Прилучный // Монография – Нижний Новгород: ФГУ «ННИИТО Росмедтех-нологий». – 2008. –184 с.
2. Колесов, С.Н. Остеохондроз позвоночника: неврологические и тепловизионные синдромы [Текст]/ С.Н. Колесов// – Н.Новгород: ООО Типография «Поволжье». – 2006. – 220 с.
3. Андреев, А.Н. Оптические измерения [Текст] // А.Н. Андреев, Е.В. Гаврилов, Г.Г. Ишанин и др.: учеб.пособие. – М.: Университетская книга; Логос. – 2008. – 416 с.

THERMAL MEDICAL SOFTWARE HARDWARE-BASED THERMAL IMAGER COX CX - 320U

© 2012 I.E. Davydov, A.N. Agafonov

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

The development of medical thermal imaging hardware and software system is considered. The basic characteristics, the main window of the program and its capabilities are performed. The prospects for the development of the developed complex are considered.

Imaging, thermal imaging system, thermal imaging diagnostics, program, characteristics.

Информация об авторах

Давыдов Игорь Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры космического машиностроения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail:

dinpol@ssau.ru. Область научных интересов: разработка медицинских аппаратно-программных комплексов.

Агафонов Андрей Николаевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры наноинженерии, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: andr_agafonov@mail.ru. Область научных интересов: разработка медицинских аппаратно-программных комплексов.

Davydov Igor Evgenyevich, candidate of technical sciences, assistant professor of space engineering, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: dinpol@ssau.ru. Area of scientific: the development of medical software and hardware.

Agafonov Andrey Nikolaevich, candidate of technical sciences, assistant professor of nanoengineering, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: andr_agafonov@mail.ru. Area of scientific: the development of medical software and hardware.

УДК 621.396.6+621.382.049.772

ФИНИШНЫЕ ПОКРЫТИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОИЗВОДСТВА СОВРЕМЕННОЙ АППАРАТУРЫ

© 2012 Ю. П. Ерендеев

ФГУП НИИ «Экран», г. Самара

Рассмотрены наиболее широко применяемые в современной электронной промышленности типы покрытий. Приведена сравнительная оценка финишных защитных покрытий печатных плат электронных узлов. Оценено влияние параметров конструкции печатной платы на характеристики покрытий.

Печатная плата, финишное покрытие, выбор, состав покрытия, параметры плат.

В современных электронных изделиях находят применение разнообразные защитные покрытия, различающиеся своими свойствами [1, 2], среди них особое место занимают финишные покрытия.

Финишные покрытия наносятся в процессе производства печатных плат (ПП) на контактные площадки (КП) и другие открытые элементы печатного рисунка. Основное назначение покрытий – защита медной поверхности контактных площадок и обеспечение качественной пайки электронных компонентов (ЭК) на печатные платы. Для выполнения данной задачи к финишным покрытиям предъявляются следующие основные требования:

- хорошая смачиваемость покрытия припоем;
- сохранение паяемости в течение длительного времени;
- предотвращение отслаивания при эксплуатации изделия;
- сочетаемость покрытий компонентов и плат.

При производстве также немаловажным фактором является еще и стоимость покрытия, поскольку она может существенно повлиять на конечную стоимость партии электронных изделий. Поэтому, несмотря на достаточно большое разнообразие финишных покрытий, сложно выбрать один вариант, соответствующий всем требованиям по стойкости, смачиваемости, долговременности и т.д.

Выбор конкретного покрытия опре-

деляется назначением тех элементов печатного рисунка, которые им покрываются. Для контактных площадок, предназначенных для пайки, основными требованиями будут паяемость и совместимость с материалом выводов компонентов и составом припоя. Для контактных площадок под компоненты, монтируемые на поверхность ПП, большую роль играет возможность обеспечения плоскостности покрытия. Когда покрытые элементы рисунка подвергаются механическим воздействиям, например, в краевых (печатных) разъемах, на выбор покрытия будут оказывать существенное влияние его механические свойства: коэффициент трения, стойкость к износу, механическая прочность. На элементы рисунка одной платы, имеющие различное назначение, могут наноситься разные покрытия, если это необходимо для обеспечения качества и надежности, либо одинаковое покрытие с «компромиссными» свойствами для упрощения процесса изготовления.

В данной работе обобщен опыт использования защитных покрытий печатных плат электронных узлов.

Рассмотрим типы покрытий, наиболее широко применяемые в современной промышленности. Среди наиболее распространенных финишных покрытий можно назвать следующие:

HASL или HAL (Hot Air Solder Leveling) – покрытие припоем с выравниванием воздушным ножом;

ENIG (electrolessnickel /immersion-

gold, также часто обозначается ImAu) – химический никель/иммерсионное золото;

ImSn – иммерсионное олово;

ImAg – иммерсионное серебро;

OSP (Organic Solderability Preservative) – органическое защитное покрытие.

Существует также ряд менее распространенных покрытий:

ImBi – иммерсионный висмут;

Pd (Electroplate Pd либо Electroless Pd) — палладий, нанесенный гальваническим, либо химическим осаждением);

Ni (Electroless Ni) – химический никель;

NiPd (Electroless Ni/Immersion Pd) – химический никель/иммерсионный палладий;

NiPdAu (Electroless NiPd /Immersion Au) – химический никель и палладий/иммерсионное золото;

NiSn (Electroplate Ni/Sn) – гальваническое осаждение никеля и олова;

SnAg (Electroplate Sn/Ag) – гальваническое осаждение олова и серебра;

Гальваническое оловянно-свинцовое покрытие (гальванический ПОС).

Горячее лужение ПОС-63 (HASL)

Процесс горячего облуживания платы, методом погружения на ограниченное время в ванну с расплавленным припоем при быстрой выемке и обдувке струей горячего воздуха, убирающей излишки припоя и выравнивающей покрытие, обеспечивает толщину 15...25 мкм (рис. 1).

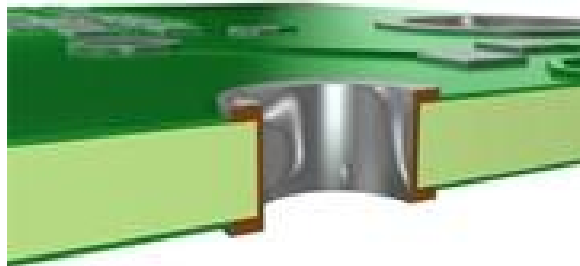


Рис. 1. Горячее лужение

HASL имеет следующие достоин-

ства:

- наиболее хорошо известный и традиционно применяющийся метод покрытия, технология его нанесения и дальнейшего использования плат покрытых HASL, хорошо отработана;
- хорошая прочность паяного соединения;
- выдерживает множество циклов пайки.

Недостатки HASL покрытий:

- значительная неплоскостность контактных площадок;
- содержание свинца, вредного для окружающей среды и обслуживающего персонала;
- затруднено применение для плат с большим соотношением толщины платы и диаметра металлизированного отверстия;
- значительная тепловая нагрузка на плату, что может вызвать ее коробление;
- жесткий термоудар, который испытывают межслойные соединения многослойной платы при погружении в расплавленный припой;
- возможны замыкания контактных площадок компонентов с малым шагом (не рекомендуется применять данный метод для компонентов с шагом менее 0,5 мм);
- неравномерная толщина покрытия на контактных площадках разного размера и ориентации.

Иммерсионное золочение (Electroless Nickel / Immersion Gold - ENIG)

Наносимое химическим методом покрытие представляет собой тонкую золотую пленку, наносимую поверх подслоя никеля. Функция золота — обеспечивать хорошую паяемость и защищать никель от окисления, а сам никель служит барьером, предотвращающим взаимную диффузию золота и меди. Обеспечивает толщину слоя Ni в пределах 3...5, а Au – 0,06...0,1 мкм (рис. 2.).



Рис. 2. Иммерсионное золочение

Имеет следующие достоинства:

- плоская поверхность, равномерная толщина покрытия;
- подходит для установки компонентов с малым шагом;
- не влияет на размер металлизированных отверстий;
- выдерживает многократное термоструктурирование;
- подходит для нажимных и скользящих контактов.

Недостатки ENIG покрытий:

- паяемость сильно зависит от правильного выбора очистителей, флюса и режимов пайки;
- печатные платы должны храниться в вакуумной упаковке в шкафах сухого хранения;
- содержит никель, который считается канцерогеном;
- не оптимально для плат с высокоскоростными сигналами;
- возможно появление дефектов типа «черные площадки»;
- ограничения по зазорам рисунка, открытых от защитной маски и на ФАФе.

Иммерсионное олово (Immersion Tin - **ImSn**)

Химическое покрытие, обеспечивающее высокую плоскостность печатных площадок платы и совместимое со всеми способами пайки, нежели ENIG. Процесс нанесения иммерсионного олова схож с процессом нанесения иммерсионного золота.

Иммерсионное олово обеспечивает хорошую паяемость после длительного

хранения, которая обеспечиваются введением подслоя органометалла в качестве барьера между медью контактных площадок и непосредственно оловом. Барьерный подслоя предотвращает взаимную диффузию меди и олова, образование интерметаллидов и рекристаллизацию олова. В данном случае подозрения, что из ImSn самопроизвольно могут образоваться нитевидные кристаллические усы, несостоятельны, поскольку толщина покрытия недостаточна для их формирования. А в результате пайки оно теряет самостоятельность для каких-либо неблагоприятных процессов, характерных для чистого олова. Обеспечивает толщину слоя 0,8...1,2 мкм (рис. 3).

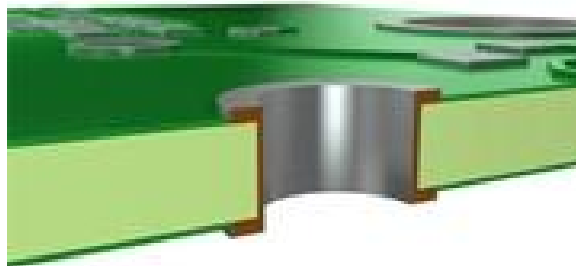


Рис. 3. Иммерсионное олово

Имеет следующие достоинства:

- отличная паяемость;
- можно использовать те же паяльные пасты, что и для плат с покрытием HAL;
- плоская поверхность, покрытие подходит для установки компонентов с малым шагом выводов;
- хорошо подходит для выполнения соединений разъемов с платой методом запрессовки по технологии Press-Fit;
- хорошо подходит для ВЧ-плат (не содержит слой никеля);
- не влияет на размер металлизированных отверстий.

Недостатки ImSn покрытий:

- платы требуют осторожного обращения;
- печатные платы должны храниться в вакуумной упаковке в шкафах сухого хранения;
- непригодно для производства клавиатур/сенсорных панелей.

Иммерсионное серебро (ImmersionAg – **ImAg**)

Используют слои толщиной от 0,05 до 0,2 мкм.

Процесс нанесения иммерсионного серебра похож на ENIG, однако заметно проще и может выполняться как в вертикальном, так и в горизонтальном варианте исполнения. Процесс, как правило, состоит из двойной предварительной очистки, предварительного погружения и серебряной ванны. Для предотвращения миграции серебра по печатной плате, серебро наносится совместно с органическим соединением, которое не только предотвращает миграцию серебра, но и предохраняет его от окисления, являясь консервирующим антиокислительным покрытием.

В процессе пайки слой серебра полностью растворяется в паяном соединении, образуя однородный сплав Sn/Pb/Ag непосредственно на медной поверхности, что дает хорошую надежность соединения, в том числе для больших корпусов BGA-компонентов. Весь процесс продолжается ~ 35 мин.

Живучесть покрытия ImAg превосходит OSP, но меньше, чем у ENIG. В противоположность OSP, контрастирующие цвета серебра и меди облегчают нахождение дефектов покрытия. В процессе хранения платы, осуществления ее сборки и пайки данное покрытие зачастую желтеет, что является результатом загрязнения воздушной среды сульфатами и хлоридами, либо неправильного обращения с платой после нанесения покрытия, вызвавшего разрушение защитного органического покрытия – перегрев, избыточное световое воздействие, жирные отпечатки пальцев. Пожелтение не влияет на свойства покрытия ImAg, сказываясь лишь на его декоративности.

Такое покрытие имеет следующие достоинства:

- хорошая плоскостность, подходит для установки компонентов с малым шагом выводов;

- не содержит никель;
- не влияет на размер металлизированных отверстий;
- длительный срок хранения (при наличии барьерного подслоя – около года);
- достаточно простой процесс нанесения;
- относительная дешевизна.

Недостатки ImAg покрытий:

- высокий коэффициент трения, что не является оптимальным для монтажа элементов методом запрессовки;
- возможное потускнение покрытия со временем.

Органическое защитное покрытие (Organicsolderability preservative – **OSP**)

Толщина покрытия обычно составляет 0,2...0,6 мкм.

OSP состоят из органического слоя (на основе бензотриазола или имидазола), лежащего непосредственно на готовой к пайке медной поверхности и защищающего ее от окисления. Процесс нанесения такого покрытия прост и легко химически контролируем, включает в себя две последовательно выполняемых операции очистки (отмывку и микротравление), а также операцию предварительного и основного нанесения покрытия с добавлением специальной добавки для предотвращения потускнения; достаточно гибко и может выполняться в горизонтальном и вертикальном варианте; при этом не повреждаются золотые немаскированные области, если они присутствуют на печатной плате. Перед нанесением OSP-покрытия отверждение паяльной маски должно быть полностью завершено. Покрытие довольно дешево, требует значительно меньших начальных затрат для своей реализации, чем HASL, и является более безопасным для окружающей среды.

Плоскостность поверхности, обеспечиваемая данным покрытием, крайне высока. Оно также прекрасно подходит для КП, расположенных с малым шагом.

Платы, изготовленные с применением покрытия OSP, могут не подходить для

применения в высокочастотных изделиях. Большинство плат для ВЧ-применений требуют припаивания металлического экрана, который механически контактирует с заземляющей шиной и обеспечивает тем самым необходимое экранирование. В случае органического покрытия достаточное экранирование может быть не обеспечено, так как не будет непосредственного контакта металлического экрана с металлом проводника, покрытым OSP.

OSP покрытия обладают следующими достоинствами:

- плоская поверхность контактных площадок;
- совместимость с бессвинцовыми тех-процессами;
- хорошая прочность паяных соединений (по некоторым данным лучше, чем для плат с покрытием HASL и иммерсионным золотом);
- быстрый и относительно дешевый процесс;
- отсутствие влияния на размер отверстий
- широкое окно процесса, хорошая контролируемость параметров.

В качестве недостатков можно отметить следующее:

- деградация при высокой температуре ограниченное количество циклов пайки;
- чувствительность к неправильному обращению, в частности, деградация покрытия под действием отпечатков пальцев;
- чувствительность к выбору флюсов;
- чувствительность к растворителям, которые применяются для удаления неправильно нанесенной паяльной пасты (спиртовые растворы удаляют до 75% покрытия, растворы на водной основе – около 15%).

При проведении электрического теста платы, тестовые пробники прокалывают покрытие, что может привести к появлению участков открытой меди.

Гальваническое золочение ножевых разъёмов (GoldFingers)

Толщина слоёв, мкм: 5...6 Ni; 1,5...3 Au (рис. 4).

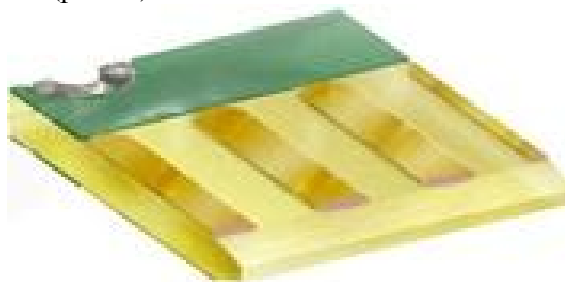


Рис. 4. Гальваническое золочение

Это гальваническое золочение контактов разъема по подслою никеля. Наносится электрохимическим осаждением (гальваника) и может использоваться совместно с другими покрытиями. Используется в основном для нанесения на концевые контакты и ламели, так же пригодно для производства клавиатур/сенсорных панелей.

Имеют следующие преимущества:

- высокую механическую прочность, стойкость к истиранию и неблагоприятному воздействию окружающей среды;
- незаменимо там, где важно обеспечить надежный и долговечный электрический контакт;
- возможность увеличить толщину в несколько раз.

Главные недостатки таких покрытий:

- высокая стоимость;
- для покрытия обязателен гальванический контакт;
- ограничения по размеру печатных плат.

В табл. 1 показана распространённость покрытий.

Как следует из табл. 1, доля применения HASL-процессов уменьшается, а использование иммерсионных покрытий растёт, что естественно связано с введением директив RoHS и применением в современных электронных

устройствах элементов с малым шагом контактных площадок.

В табл. 2 приведено влияние параметров конструкции ПП на покрытия. В табл. 3 приведена оценка покрытий и

процесса изготовления печатной платы. В табл. 4 приведена сравнительная оценка показателей сборки для различных покрытий. В таблице 5 приведены общие показатели покрытий.

Таблица 1. Распространенность финишных покрытий на мировом рынке печатных плат

Финишное покрытие	Год				
	2000	2003	2005	2008	2011
HASL-процесс	65%	62%	54%	45%	25%
ИК-оплавление	3%	2%	2%	1%	1%
Органическое покрытие (бытовые изделия)	10%	11%	12%	12%	12%
Иммерсионное золото по никелю	14%	16%	19%	26%	30%
Иммерсионное олово с барьерным подслоем	1%	3%	8%	11%	28%
Другие покрытия	7%	6%	5%	5%	4%
Всего	100%	100%	100%	100%	100%

Таблица 2. Влияние параметров конструкции ПП на покрытия

Параметры конструкции ПП	Покрытия				
	HASL	OSP	ENIG	ImAg	ImSn
Компенсация диаметров отверстий	Требуется, на 0,050 ... 0,076 мм	Стандартно	Стандартно	Стандартно	Стандартно
Минимальный размер сквозного отверстия	Максимальное отношение длины к диаметру отверстия 6:1	Нет ограничений	Нет ограничений	Нет ограничений	Нет ограничений
Отверждение маски на металлизированных отверстиях	УФ/Термическое	УФ	УФ/Термическое	УФ	УФ
Использование в качестве контактного покрытия	Плохо	Не рекомендуется	Хорошо для контактов, подвергающихся небольшому износу	Хорошо для контактов, подвергающихся небольшому износу	Хорошо для контактов, подвергающихся небольшому износу
Установка электромагнитного экрана	Нормально	Не рекомендуется	Нормально	Нормально	Нормально

Таблица 2. Окончание

Параметры конструкции ПП	Покрытия				
	HASL	OSP	ENIG	ImAg	ImSn
Участки открытой меди	Отсутствуют	Участки, где после сборки нет паяных соединений	Отсутствуют	Отсутствуют	Отсутствуют

Таблица 3. Оценка покрытий и процесса изготовления печатной платы

Процесс изготовления печатной платы	Покрытия				
	HASL	OSP	ENIG	ImAg	ImSn
Техпроцесс по характеру выполнения	Конвейерный или вертикальный	Конвейерный	Только вертикальный	Конвейерный или вертикальный	Конвейерный или вертикальный
Температура процесса, °С	250	40	85	50	60
Степень опасности для человека и окружающей среды	Высокая (свинец, температура)	Низкая	Средняя	Низкая	Высокая (присутствие тиомочевины)
Время выдержки между циклами оплавления	Не имеет значения	24 часа	Не имеет значения	Не имеет значения	24 часа
Проблемы качества	Перемычки между выводами ЭК с малым шагом недостаточная плоскостность для μ BGA	Неправильное обращение с платами	Пропуски покрытия/ Лишнее покрытие	Неправильное обращение с платами	Негативное воздействие паяльной маски/Неправильное обращение с платами
Ремонтпригодность законченной сборки	Зависит от конструкции (после разделения групповой панели)	Хорошая	Ограничена нанесением покрытий Ni и Au с помощью гальванического натирания	Ограниченная	Средняя

Таблица 3. Окончание

Процесс изготовления печатной платы	Покрытия				
	HASL	OSP	ENIG	ImAg	ImSn
Частота технического обслуживания оборудования	Часто	Редко	Обычный вертикальный процесс	Редко	Редко
Измерение толщины покрытия	Рентгеновский флуоресцентный контроль изделия	С помощью УФ-спектрофотометра по тестовому образцу	Рентгеновский флуоресцентный контроль изделия	Рентгеновский флуоресцентный контроль изделия	Рентгеновский флуоресцентный контроль изделия
Технологичность	Высокая	Очень высокая	Очень низкая	Очень высокая	Низкая
Производственные затраты по нанесению финишного покрытия	1X	0,3X	2X	1X	1X

Таблица 4. Сборка и покрытия

Сборка	Покрытия				
	HASL	OSP	ENIG	ImAg	ImSn
Паяемость	Отличная	Хорошая	Отличная	Отличная	Отличная
Расстояние между элементами проводящего рисунка	Ограничено шагом КП для QFP-компонентов, равным 0,5 мм	Нет ограничений	Для медных элементов: min. 0,1 мм без перемычек паяльной маски	Нет ограничений	Нет ограничений
Установка BGA-компонентов	Копланарность/Интерметаллиды Sn-Cu	Интерметаллиды Sn-Cu	Интерметаллиды Sn-Ni	Интерметаллиды Sn-Cu	Интерметаллиды Sn-Cu
Неправильное нанесение отпечатков пасты	Нормальная очистка с помощью протирки	Снижает время промежуточного хранения между операциями оплавления	Нормальная очистка с помощью протирки	Согласно рекомендациям поставщика (ограничения на использование очищающих реагентов)	Нормальная очистка с помощью протирки

Таблица 4. Окончание

Сборка	Покрытия				
	HASL	OSP	ENIG	ImAg	ImSn
Пригодность для выполнения соединений методом запрессовки	Да	Да	Да	Да	Да
Пригодность для выполнения соединений трением/установка краевых разъемов	Не рекомендуется	Нет	Не рекомендуется	Не рекомендуется	Нет
Пригодность для производства клавиатур/сенсорных панелей	Не рекомендуется	Нет	Не рекомендуется	Да	Нет
Прочность паяного соединения	Хорошая	Отличная	Хорошая (проблемы могут возникать с большими BGA-корпусами) Дефекты «черная контактная площадка» и охрупчивание паяных соединений	Отличная	Хорошая
Долговечность покрытия	Хорошая	В зависимости от условий обращения	Очень хорошая	В зависимости от условий обращения и хранения	Хорошая

Таблица 5. Сводная таблица финишных покрытий печатных плат

	HASL	ENIG	ImSn	ImAg	OSP
Срок хранения	12 месяцев	6 месяцев		9 месяцев	12 месяцев
Паяемость	Отличная	Хорошая		Отличная	Хорошая

Таблица 5. Продолжение

	HASL	ENIG	ImSn	ImAg	OSP
Стойкость к многократным перепайкам	Да				Да*
Термопрофиль при пайке оплавлением	Не критично**				номин. 230°C, макс. 250°C
Совместимость с процессом разварки золотом	Нет	Да***	Нет		
Совместимость с процессом разварки алюминием	Нет	Да	Нет	Да	Нет
Толщина покрытия	1...40 мкм Pb/Sn	3-5 мкм Ni 0,05... 0,2 мкм Au	0,8... 1 мкм	0,2...0,5 мкм	Мин. 0,2 мкм
Шаг контактных площадок	>= 0,5 мм	< 0,5 мм			
Температура процесса	250°C	< 90°C	< 80°C	< 55°C	< 45°C
Изгиб и скручивание	Проблемы	Нет			
Стабильность размеров	Проблемы	Нет			
Копланарность контактных площадок	Плохая	Отличная			
Чистота поверхности	Средняя	Хорошая	Проблемная	Хорошая	Отличная
Коррозионная стойкость	Средняя	Хорошая	Средняя	Хорошая	Отличная
Визуальные проблемы	Нет			Потеря цвета	Крапинки
Риски по качеству	Уменьшение размера отверстий	Чёрные площадки	Дендриты	Нет	
Надёжность паяных соединений	Хорошая	Средняя		Отличная	

Таблица 5. Окончание

	HASL	ENIG	ImSn	ImAg	OSP
Совместимость с бессвинцовыми процессами	Нет	Да			
Вред окружающей среде	Высокий	Средний	Средний - высокий	Средний	Низкий
Стоимость процесса	Низкая	Высокая	Средняя		Самая низкая

*максимальная температура пайки оплавлением не более 240°C. Время между пайкой оплавлением и ручной пайкой (или пайкой волной) не должно превышать 5 дней;

**требуется специальный процесс при котором толщина золота достигнет минимум 0,3 мм;

***если температура пайки оплавлением менее 240°C, требуется сушка платы перед пайкой (предотвращает деламацию, связанную с влагой, содержащейся в стеклотекстолите)

Заключение

Покрытие горячим лужением было наиболее широко применяемым финишным покрытием. В некоторых странах использование лужения свинцовосодержащими припоями уже запрещено, и вместо него используются альтернативные варианты. По мере всё большего внедрения бессвинцовых технологий повышается вероятность внедрения альтернативных финишных покрытий. Покрытие OSP не является естественной заменой HASL, но, несмотря на это, оно стало одним из первых альтернативных покрытий, которые попробовали производители электроники. Однако это покрытие вызывает существенные проблемы при электроконтроле плат и требует существенных изменений в техпроцессе: в отношении применяемого типа флюса и числа циклов нагрева.

Наиболее близкие и вероятные заменители горячему лужению – иммерсионное серебро и олово – обладают массой преимуществ, и почти лишены недостатков, к тому же, решаемых или уже решённых. Иммерсионное серебро позволяет мгновенно переключиться с покрытия горячим лужением (HASL) и не требует менять параметры пайки. В процессе пайки

серебряный слой растворяется в паяном соединении, образуя сплав олово-свинец-серебро на меди, что обеспечивает очень надежные паяные соединения компонентов (BGA). По стоимости эти покрытия находятся на уровне, близком к горячему лужению, и оказывают гораздо меньший вред окружающей среде.

В последнее время наметилась тенденция применения производителями покрытия ENIG. Оно всем хорошо, но очень дорого стоит. В основном это покрытие становится популярным при изготовлении прототипных образцов и мелкосерийных партий сложных печатных плат от 5 класса точности и в спецтехнике.

Библиографический список

1. Андреев, П.Г. Защита радиоэлектронных средств от внешних воздействий: учеб.пособие [Текст] / П.Г. Андреев, И.Ю. Наумова. – Пенза: Изд-во ПГУ. – 2012. – 130 с.
2. Тюлевин, Е.В. Защитные покрытия электронных узлов космических РЭС [Текст] / С. В. Тюлевин, А.В. Наседкин, А.И. Архипов, М.Н. Пиганов // Радиолокация и радиосвязь: докл. V Всероссийской НТК, 21–25.11.2011. – М.: ИРЭ РАН. – 2011. – С. 125-128.

THIN COATING FOR PRINTED CIRCUIT BOARDS IN INDUSTRIAL PRODUCTION TECHNOLOGY OF MODERN EQUIPMENT

© 2012 J. P. Erendeev

Federal State Unitary Enterprise Research Institute "Ekran"

Considered the most widely used in modern electronic industry types of coatings. Comparative evaluation of finishing coatings of printed circuit board electronic components. Assessing the impact of design parameters on the performance of PCB coatings.

The printed circuit board, surface finish, choice, composition of the coating parameters boards.

Информация об авторе

Ерендеев Юрий Петрович, главный технолог, ФГУП «НИИ «Экран». E-mail: eyr51@mail.ru. Область научных интересов: технология поверхностного монтажа, электронные узлы, защитные покрытия, паянные соединения.

Erendeev Yuri Petrovich, chief technologist, Federal State Unitary Enterprise "Research Institute "Ekran". E-mail: eyr51@mail.ru. Area of scientific: surface mount technology, electronic components, protective coatings, solder joints.

УДК 004.9

ВНЕДРЕНИЕ МУЛЬТИ- И ГИПЕРМЕДИА ПОСОБИЙ КАК ИННОВАЦИОННЫЙ ПУТЬ СОЗДАНИЯ НОВЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ ПРИ ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ И ТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА ПРОИЗВОДСТВА И СФЕРЫ УСЛУГ

© 2012 А. А. Нечитайло, С. А. Нечитайло

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

В статье рассматриваются существующие предпосылки необходимости создания и внедрения мультимедиа пособий в производственные и постпроизводственные процессы различных сфер народного хозяйства, в том и числе машино- и ракетостроительную. Обоснована необходимость применения мультимедиа пособий при обучении студентов, обучении технического производственного и обслуживающего персонала, а также работников сферы услуг.

Мультимедиа пособие, гипермедиа пособие, инновационные учебные пособия, обучение персонала, аудиовизуальные средства обучения, креативный контент.

Совершенствование (усложнение) современной техники требует всё большего и большего времени на приобретение техническим персоналом необходимых компетенций для его обслуживания, ремонта и эксплуатации.

Впервые серьезно об этой проблеме в Западной Европе заговорили в середине 60-х годов прошлого века. Так, например, телевизионные лекции впервые были включены в просветительные программы телевидения ПНР в феврале 1966 г. До июня того года эти лекции охватывали математику и физику на уровне средней школы и были предназначены для поступающих на первый курс технических учебных заведений без отрыва от производства. В сентябре 1966 г. был начат полный цикл лекций для первокурсников политехнических учебных заведений в объёме 214 часов (математика — 125, начертательная геометрия — 16, химия — 16, физика — 57 лекционных единиц). В следующем академическом году телевизионные лекции уже читались параллельно для первого (повторно) и второго курсов учебы, а в 1968/69 учебном году была усовершенствована программа обучения и возобновлены занятия на подгото-

вительном курсе.

Польский телевизионный политехнический институт вызвал живую заинтересованность во всём мире. Свидетельством такой заинтересованности явилось, в частности, общеевропейское совещание специалистов по вопросу использования мультимедиа в высшем образовании, которое состоялось в Варшаве в сентябре 1968 г. Опыт телевизионного политехнического обучения сегодня используется, в частности, Телевизионным сельскохозяйственным техникумом и Радиотелевизионным педагогическим университетом в ПНР, а также Открытым университетом в Великобритании [1].

Аудиовизуальные средства обучения оказывают значительное воздействие на обучаемого (в частности, студента), а также способствуют усвоению определенных впечатлений, наблюдений и представлений. Они воздействуют одновременно на два анализатора (зрительный и слуховой), что существенно образом определяет их привлекательность. На сегодняшний день, учитывая бурное развитие информационных технологий во всех отраслях народного хозяйства, к числу аудиовизуальных средств можно отнести учеб-

ный видеофильм, электронные издания учебников и пособий, интерактивные тестовые задания и аудиопособия.

Но недостаточно просто оцифровать и озвучить традиционный бумажный учебник – необходимо в корне менять систему предоставления информации обучаемому и особенно производственному (рис. 1). Ещё в XVII веке Я. Коменский – чешский мыслитель, педагог, общественный деятель – выдвинул «золотое правило дидактики»: «Всё, что только можно предоставлять для восприятия чувствами,

а именно: видимое – для восприятия зрением, слышимое – слухом, запахи – обонянием, подлежащее вкусу – вкусом, доступное осязанию – путём осязания. Если какие-либо предметы сразу можно воспринять несколькими чувствами, пусть они сразу схватываются несколькими чувствами...» [2]. Эти взгляды Коменского были поддержаны и развиты И. Г. Песталоцци, К. Д. Ушинским и другими великими педагогами.

Более того, Ушинский считал, что наглядное обучение «...это такое учение,

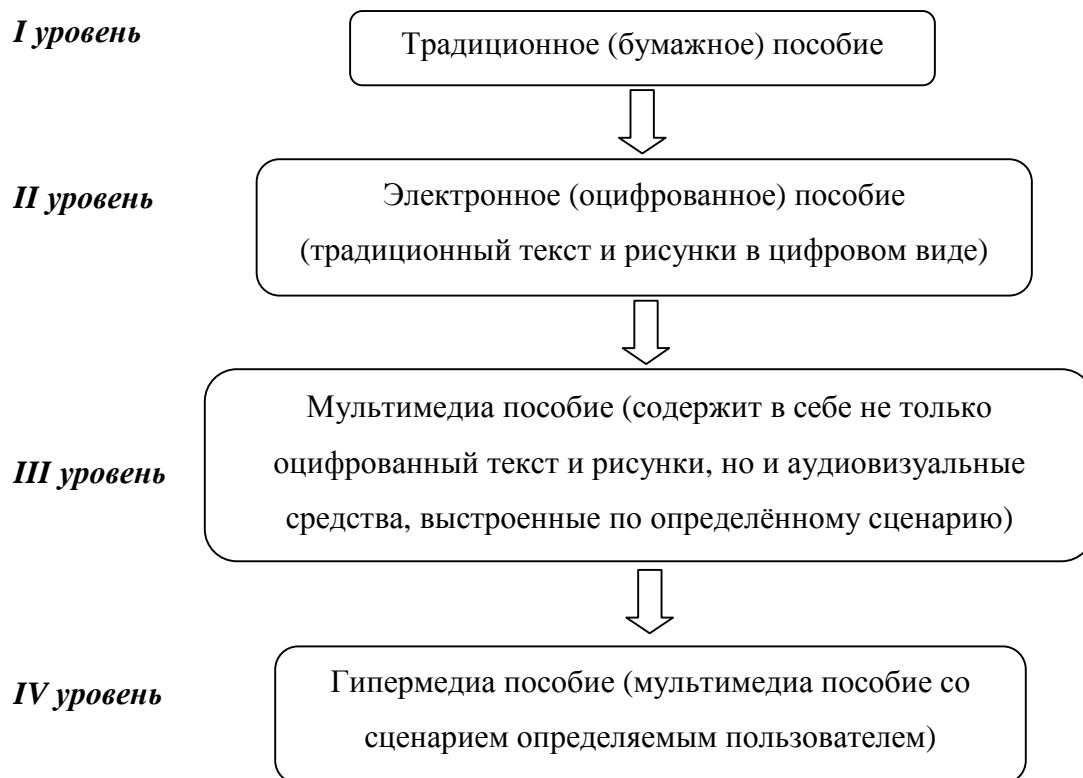


Рис. 1. Эволюция средств обучения

которое строится не на отвлечённых представлениях и словах, а на конкретных образах, непосредственно воспринятых обучаемым: будут ли эти образы восприняты при самом учении, под руководством наставника, или прежде самостоятельным наблюдением, так, что наставник находит в душе обучаемого уже готовый образ и на нём строит ученье. Это ход учения от конкретного к отвлечённому, от представления к мысли...» [3].

В 1988 году Европейская комиссия по проблемам внедрения и использования новых технологий предложила следующее определение: *мультимедиа* — продукт, содержащий «коллекции изображений, текстов и данных, сопровождающихся звуком, видео, анимацией и другими визуальными эффектами (Simulation) и включающий интерактивный интерфейс и другие механизмы управления»[4].

Мультимедиа – взаимодействие ви-

зуальных и аудиоэффектов под управлением интерактивного программного обеспечения с использованием современных технических и программных средств, они объединяют текст, звук, графику, фото, видео в одном цифровом представлении [5].

Исходя из этих определений, можно говорить о мультимедиа-технологиях как об эффективнейшем интерактивном инструменте решения проблем обучения не только студентов, но и квалифицированного персонала современного производства и сферы услуг.

В число этих программных продуктов входят игровые программы, симуляторы, обучающие программы и репетиторы, энциклопедии и познавательные программы. Это даёт возможность совместного использования текста, графических изображений, звука, анимации и видео с помощью компьютера или другой электронной техники. Простейшая форма представления множества элементов мультимедиа – линейный проект. В этом случае пользователь может выполнять только пассивный просмотр элементов мультимедиа. Последовательность просмотра элементов мультимедиа определяется сценарием разработчика. Если пользователю предоставлена возможность выбора и управления, то мультимедиа становится нелинейным и интерактивным. Если пользователю предоставляется структура связанных элементов мультимедиа, которые он может последовательно выбирать, интерактивное мультимедиа становится гипермедиа. Гипермедиа – термин, введённый Тедом (Теодором) Нельсоном и использованный в его работе «Complex information processing: a file structure for the complex, the changing and the indeterminate» [6].

Иными словами *гипермедиа* — это гипермедиа пособие, в которое включены графика, звук, видео, текст, ссылки и возможности его интерактивного использования по желанию пользователя с целью создания нелинейной среды информации [7].

Связывание элементов гипермедиа в проект выполняется с помощью программных и инструментальных средств. Результаты представления видео- и аудио-элементов гипермедиа и средства управления ими, называются пользовательским интерфейсом. Аппаратные и программные средства, обеспечивающие воспроизведение гипермедиа и ограничивающие возможности проекта, называются платформой или средой мультимедиа.

В России отношения в области аудиовизуальных (читай *гипермедиа*) произведений регулируются Гражданским кодексом (статья 1263, часть 3):

1. Аудиовизуальным произведением является произведение, состоящее из зафиксированной серии связанных между собой изображений (с сопровождением или без сопровождения звуком) и предназначенное для зрительного и слухового (в случае сопровождения звуком) восприятия с помощью соответствующих технических устройств. Аудиовизуальные произведения включают кинематографические произведения, а также все произведения, выраженные средствами, аналогичными кинематографическим (теле- и видеофильмы и другие подобные произведения), независимо от способа их первоначальной или последующей фиксации.

2. Авторами аудиовизуального произведения являются:

а) режиссер-постановщик;

б) автор сценария;

в) композитор, являющийся автором музыкального произведения (с текстом или без текста), специально созданного для этого аудиовизуального произведения.

3. При публичном исполнении либо сообщении в эфир или по кабелю аудиовизуального произведения все его авторы сохраняют право на вознаграждение за указанные виды использования.

4. Права изготовителя аудиовизуального произведения, то есть лица, организовавшего создание такого произведения (продюсера), определяются в соответствии со статьей 1240 настоящего Кодекса.

Изготовитель вправе, при любом использовании аудиовизуального произведения, указывать своё имя или наименование, либо требовать такого указания. При отсутствии доказательств, иного изготовителем аудиовизуального произведения признается лицо, имя или наименование которого указано на этом произведении обычным образом.

5. Каждый автор произведения, вошедшего составной частью в аудиовизуальное произведение, как существовавшего ранее (автор произведения, положенного в основу сценария, и другие), так и созданного в процессе работы над ним (оператор-постановщик, художник-постановщик и другие), сохраняет исключительное право на свое произведение, за исключением случаев, когда это исключительное право было передано изготовителю или другим лицам, либо перешло к изготовителю или другим лицам по иным основаниям, предусмотренным законом [8].

Очевидно, назрела необходимость создавать современные отечественные электронные учебные и технические пособия и, возможно, другие издания ориентируясь на рекомендации Я. Коменского, К. Д. Ушинского, Т.Х. Нельсона и их современных последователей. Естественно, что это должны быть гипермедиа издания. Для этого требуется всего лишь осознать необходимость слияния технических и гуманитарных технологий.

Опыт ведущих зарубежных стран показывает, что в постиндустриальном мире гуманитарные технологии и технические технологии взаимодействуют все плотнее. Причем это взаимодействие дает значительный синергетический эффект. Сегодня необходимо переступить некий психологический барьер и придать креативную составляющую разработке, по крайней мере учебной и эксплуатационной документации, на основе гипермедиа технологий. Это подразумевает, исходя из опыта ведущих мировых корпораций, создание, прежде всего, современных креативных коллекти-

вов по разработке контента гипермедиа изданий. Такие коллективы, как правило, формируются из технических специалистов, сценаристов, редакторов, музыкантов, дикторов и других специалистов под руководством продюсера.

Что касается программного и технического обеспечения, то оно существует в достаточно разнообразном количестве при приемлемой стоимости и совместимо с нашими обычными персональными компьютерами [9].

Библиографический список

1. Википедия [Электронный ресурс] / Свободная энциклопедия. – Электрон. данные – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org>, свободный. Загл. с экрана. Яз. рус.
2. Соколов, Е.А. Психология познания: методология и методика познания [Текст] / Е.А. Соколов. - М.: изд-во Университетская книга, 2007. – 530 с.
3. Ушинский, К.Д. Сочинения [Текст]: в 6 т. / К.Д. Ушинский. - М.: Педагогика, 1949. – 6 т.
4. N.Rustamov Kompüter, İnformasiya texnologiya-larının əsasları (Dərs vəsaiti) “Multimedia” İnformasiya Sistemləri və Texnologiyaları mərkəzi, Bakı-2006. - 304 səh.
5. Википедия [Электронный ресурс] / Свободная энциклопедия. – Электр. дан. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org>, свободный. Загл. с экрана. Яз. рус.
6. Complex information processing: a file structure for the complex, the changing and the indeterminate [Электр. ресурс] / ACM digital library. – Электр. дан. – Режим доступа: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=806036> свободный. Загл. с экрана. Яз. англ.
7. Дидактика средней школы [Электронный ресурс] / Некоторые проблемы современной дидактики. Материал ориентирован для студентов педагогических институтов. – Электр. дан. – Режим доступа: <http://didaktica.ru/didakticheskesredstva/138-audiovizualnyesredstva-obucheniya.html>, свободный. Загл. с экрана. – Яз. рус.

8. Гражданский процессуальный кодекс Российской Федерации [Текст]: (принят Гос. Думой 23 окт. 2002 г.: офиц. текст: одобр. Советом Федерации 30 окт. 2002 г.) – М.: Маркетинг, 2007. – 198 с.

9. Toshiba [Электронный ресурс] / Interactive Training Manuals. – Электр. дан. – Режим доступа: <http://www.toshibamedia.com/6550c/base.html>, свободный. Загл. с экрана. Яз. англ.

IMPLEMENTATION OF MULTI- AND HYPERMEDIA AS AN INNOVATIVE WAY OF CREATING NEW COMPETENCY IN TEACHING STUDENTS AND TECHNICIANS MANUFACTURING AND SERVICES

© 2012 A.A. Nechitailo, S.A. Nechitailo

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

The article discusses the need for the existing conditions and the introduction of multi-and hypermedia benefits in production and post-production processes of various sectors of the economy, and in the number of engineering and rocket engineering. The necessity of multi-and hypermedia tools in teaching students, training of technical and production staff, as well as service workers.

Multimedia guide, hypermedia manual, innovative teaching aids, training, audio-visual learning, creative content.

Информация об авторах

Нечитайло Александр Анатольевич, доктор экономических наук, профессор, директор института печати, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва. E-mail: ip.ssau@mail.ru. Область научных интересов: инновационные методы в образовании, производстве и сфере услуг.

Нечитайло Сергей Александрович, кандидат экономических наук, ассистент кафедры издательского дела и книгораспространения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва. E-mail: s.nechit@gmail.com. Область научных интересов: инновационные методы в образовании и сфере услуг.

Nechitailo Alexander Anatolyevich, doctor of economic sciences, professor, director of the Press Institute. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: ip.ssau@mail.ru. Area of scientific: innovative methods in education, manufacturing and service sectors.

Nechitailo Sergey Alexandrovich, candidate of economic sciences, assistant professor of publishing and book distribution. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: s.nechit@gmail.com. Area of scientific: innovative practices in education and the service sector.

БИНАРНЫЙ ОПТОМЕХАНИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ

© 2012 Д. В. Корбан

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

Рассмотрены особенности проектирования и применения бинарных оптомеханических датчиков дифференциального типа для автоматизированных систем управления и контроля. Проанализированы преимущества и недостатки данного решения, определены условия использования датчиков, выполнен расчет информационных возможностей системы. Показана инвариантность режимов работы датчика к воздействию ряда эксплуатационных факторов.

Бинарный оптомеханический датчик дифференциального типа, кодирующий элемент, матрица допустимых кодовых комбинаций

Многие современные автоматизированные системы управления и контроля характеризуются использованием волоконно-оптических датчиков в качестве первичных преобразователей информации и оптических волокон в качестве физической среды передачи сигналов [1, 2]. Надежность и помехоустойчивость таких систем обеспечивается концепцией их построения, согласно которой чувствительный к воздействию дестабилизирующих факторов блок электронной обработки выносится за пределы рабочей зоны. В то же время, сложные технические объекты требуют принятия дополнительных мер по обеспечению качества и надежности автоматизированных систем управления и контроля [3].

Одним из таких способов повышения надежности является получение, сопоставление и анализ данных, полученных от альтернативных источников [4]. Понятно, что данный подход требует большего числа не только источников информации – датчиков, но и соединительных линий между датчиками и блоком электронной обработки, что автоматически приводит к резкому удорожанию системы. В результате, высокая стоимость волоконно-оптических компонентов сводит на нет их несомненные технические

преимущества. Выходом из данной ситуации представляется организация множественного доступа датчиков к единому волоконно-оптическому каналу передачи данных. Организация такого множественного доступа в данной работе рассматривается для случая бинарных оптомеханических датчиков перемещений [5].

Бинарный оптомеханический датчик – аналог электронного компаратора, поскольку он предназначен для определения порогового значения физического параметра. Его также можно рассматривать, как измерительный аналого-цифровой преобразователь с вырожденной шкалой. Бинарные оптомеханические датчики перемещений бывают двух типов:

- потенциального (абсолютного) типа – значение кода может быть считано в любой момент времени;

- дифференциального типа – значение кода может быть считано только в момент изменения состояния датчика.

Использование датчиков дифференциального типа, несмотря на известные ограничения [6], открывает принципиально новые возможности организации множественного доступа к единому каналу передачи данных и является одним из способов решения актуальной задачи создания надежных и помехо-

устойчивых устройств систем управления и контроля.

Базовая конструкция бинарного оптомеханического датчика перемещений представлена на рис. 1.

В корпусе 1 датчика находится подвижный цилиндр 2 с внешней и внутрен-

ней резьбой. Внутренняя резьба предназначена для точной фиксации винта 3, головка которого играет роль чувствительного элемента и воспринимает осевые F_1 и/или поперечные F_2 перемещения объекта контроля. Гайка 4 накручивается на внешнюю резьбу цилиндра 2 и

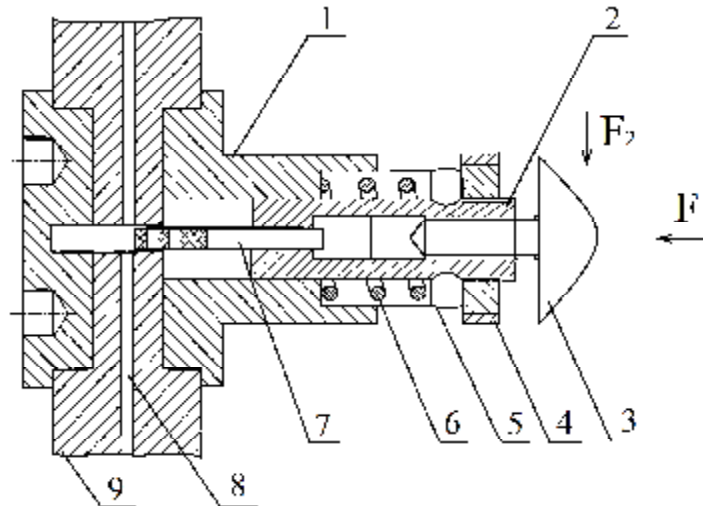


Рис. 1. Базовая конструкция бинарного оптомеханического датчика перемещений

удерживает кольцо 5, которое связано с пружиной 6. При этом один конец пружины упирается в кольцо, а другой – в корпус датчика. При нажатии через головку винта 3 на цилиндр 2 пружина сжимается. При этом закрепленный на противоположном конце цилиндра 2 кодирующий элемент 7 перемещается и попадает в зазор между отрезками оптических волокон 8. Волокна установлены на одной оптической оси в корпусе датчика с помощью юстированных втулок 9. Кодирующий элемент 7 представляет собой амплитудный растр с чередующимися прозрачными и непрозрачными участками. При его перемещении происходит модуляция потока оптического излучения по мощности. Методика выбора прозрачных и непрозрачных участков кодирующего элемента 7 изложена в [7].

Рассмотрим двухштриховой способ кодирования информации о порядковом номере датчика в системе и характере смены его логического состояния. Форма оптического сигнала на выходе датчика будет определяться структурой кодирую-

щего элемента 7. Один из вариантов набора кодирующих элементов изображен на рис. 2.

Кодовый рисунок состоит из прозрачных и непрозрачных элементов. Прозрачные элементы часто называют глазками (*eyehole*), а непрозрачные – штрихами (*stroke*). Заметим, что за пределами кодирующей шкалы l кодирующий элемент прозрачен и волоконно-оптический канал открыт для любого датчика системы. На прозрачный растр наносятся два штриха дискретной длины, расположенные в различных позициях в пределах линейной кодирующей шкалы. Длина кодирующей шкалы $l = 8s$, где s – длина дискретного шага штриха, причем $s = d$, где d – диаметр сердцевины оптического волокна (область считывания кода). Образующие штрихами кодовые комбинации уникальны для каждого датчика системы управления и контроля. Исключены симметричные (1, 1; 2, 2; 3, 3 и т.д.) кодовые комбинации, поскольку в противном случае невозможно определить направление движения кодирующего элемента, кото-

рое определяет характер смены логического состояния. Кроме того, кодовые комбинации прямого хода кодирующего элемента (вдоль оси L) одного датчика не должны повторять кодовые комбинации реверсивного хода другого датчика (1, 2 – 2, 1; 2, 3 – 3, 2 и т.д.). Между штрихами предусмотрен зазор величиной не менее s , необходимый для их идентификации.

Поиск допустимых кодовых комбинаций ($S_{1,i}; S_{2,j}$), где первый индекс – номер штриха, второй – его дискретная длина, удобно выполнять с помощью матри-

цы (табл. 1). Порядковые номера строк и столбцов в таблице равны дискретной длине соответствующих им штрихов. Значение элементов внутри таблицы означает допустимую (1) или запрещенную (0) кодовую комбинацию.

Запрещенными элементами матрицы будут элементы главной диагонали, половина элементов в позициях, симметричных относительно главной диагонали, а также элементы, сумма порядковых номеров строк и столбцов которых превышает значение $l - s = 7s$.

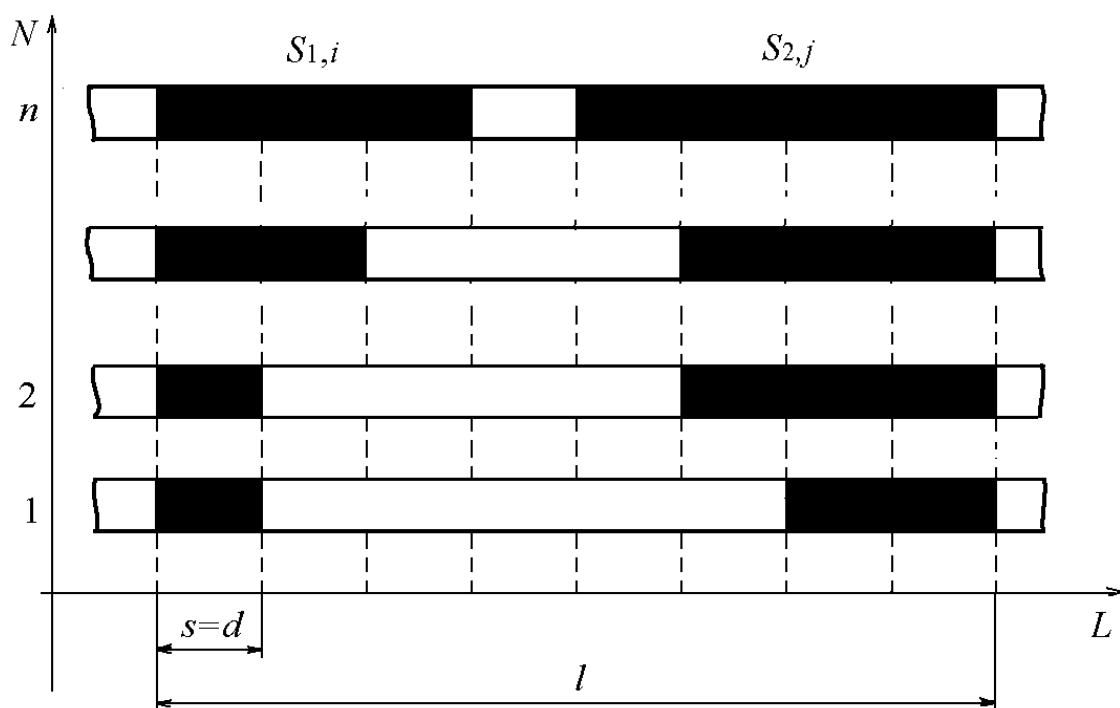


Рис. 2. Набор кодирующих элементов для бинарных оптомеханических датчиков перемещений

Таблица 1. Матрица допустимых кодовых комбинаций

	$S_{2,1}$	$S_{2,2}$	$S_{2,3}$	$S_{2,4}$	$S_{2,5}$	$S_{2,6}$	$S_{2,7}$
$S_{1,1}$	0	1	1	1	1	1	0
$S_{1,2}$	0	0	1	1	1	0	0
$S_{1,3}$	0	0	0	1	0	0	0
$S_{1,4}$	0	0	0	0	0	0	0
$S_{1,5}$	0	0	0	0	0	0	0
$S_{1,6}$	0	0	0	0	0	0	0
$S_{1,7}$	0	0	0	0	0	0	0

Из табл. 1 следует, что набор допустимых кодовых комбинаций для рассматриваемого случая будет следующим: $(S_{1,1}; S_{2,2})$, $(S_{1,1}; S_{2,3})$, $(S_{1,1}; S_{2,4})$, $(S_{1,1}; S_{2,5})$, $(S_{1,1}; S_{2,6})$, $(S_{1,2}; S_{2,3})$, $(S_{1,2}; S_{2,4})$, $(S_{1,2}; S_{2,5})$, $(S_{1,3}; S_{2,4})$. Таким образом, в систему управления и контроля в этом случае можно включить не более девяти датчиков.

Обобщим данный пример. Для последующих выкладок введём безразмерный параметр p , равный отношению длины кодирующей шкалы к длине дискретного шага штриха:

$$p = \frac{l}{l'} \quad (1)$$

Будем исходить из того, что p – целое число и $p \geq 4$.

В общем случае максимальное число датчиков системы определяется для четных p формуле:

$$N_{\text{ч}} = (p/2 - 1)^2 \quad (2)$$

Для нечетных значений p максимальное количество датчиков равно:

$$N_{\text{н}} = ((p-1)/2 - 1)^2 + (p-3)/2 \quad (3)$$

Формулы (1) – (3) являются основой расчёта информационных возможностей системы управления и контроля, выполненной на основе бинарных датчиков.

Двухштриховое кодирование позволяет снизить воздействия ряда эксплуатационных факторов, в частности, девиации скорости перемещений, методом относительных измерений. Скорость перемещения кодирующего элемента определяется конструктивными особенностями датчика (механические свойства пружины, эффекты трения) и поведением контролируемого объекта. Для каждого датчика системы скорость срабатывания может существенно отличаться. Варьирование скорости может происходить также при каждом срабатывании одного и того же датчика. Инвариантность к изменению скорости срабатывания достигается измерением разности длительностей временных интервалов, которые соответствуют позиционным перемещениям кодирующего элемента относительно области считывания.

Для кодовой комбинации $(S_{1,2}, S_{2,2})$ получаем позиционные и временные диаграммы, представленные на рис. 3.

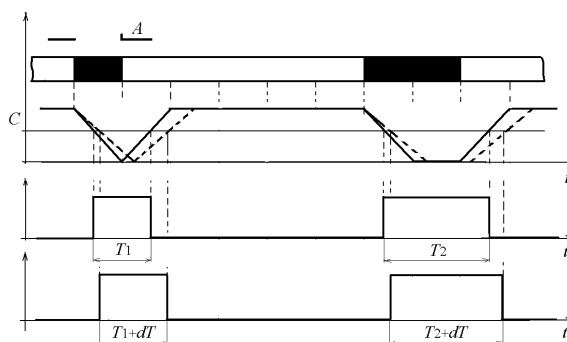


Рис. 3. Позиционные и временные диаграммы работы бинарного датчика

В первом случае при перемещении кодового элемента относительно области считывания (метка A) в моменты принятия решений C в электронном блоке формируется пара прямоугольных импульсов с длительностями T_1 и T_2 . В случае изменения скорости перемещения (пунктирная линия) длительности обоих импульсов меняются на величину dT . При любых изменениях выполняется равенство:

$$T_2 - T_1 = (T_2 + dT) - (T_1 + dT) \quad (4)$$

Из (4) следует, что при любом отклонении скорости переключения датчика величина dT остаётся постоянной. Следовательно, постоянной будет также разница в длительности импульсов, формируемых заданной кодовой комбинацией.

Главным недостатком датчиков дифференциального типа является возможность наложения сигналов, поступающих с разных устройств в асинхронном режиме. Для снижения вероятности потери данных используются приемы, рассмотренные в [8].

В то же время, динамический диапазон изменения оптических сигналов одинаков для всех датчиков и зависит только от потерь в линии связи. Организация множественно доступа к каналу передачи данных позволяет решить одну из серьезных проблем на пути широкого внедрения волоконно-оптических систем – снижение стоимости при сохранении надежности и функциональных возможностей системы.

Применение автоматизированных систем управления и контроля на основе бинарных оптомеханических датчиков позволяет достаточно просто масштабировать систему при необходимости добавления в нее новых устройств. Затраты при этом минимальны, поскольку использование дополнительных дорогостоящих волоконно-оптических компонентов не предусмотрено.

Библиографический список

1. Гармаш, В.Б. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении [Текст] / В.Б. Гармаш, Ф.А. Егоров, Ф.А., Л.Н. Коломиец // Спецвыпуск «Фотон-Экспресс», 2005. - № 6. - с. 128 – 140.
2. Гиниятулин, Н.И. Волоконно-оптические преобразователи информации [Текст] / Н.И. Гиниятулин – М.: Машиностроение, 2004. – 328 с.
3. Голубятников, И.В. Системы мониторинга сложных объектов [Текст] / И.В. Голубятников, В.А. Зеленский, В.Е. Шатерников – М.: Машиностроение, 2009. – 172 с.
4. Макарова, И.М. Интеллектуальные системы автоматического управления

[Текст] / Под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.

5. Зеленский, В.А. Волоконно-оптические информационно-измерительные системы с мультиплексированными каналами передачи бинарных сигналов [Текст] / В.А. Зеленский - Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2009.- 124 с.

6. Зеленский, В.А. Волоконно-оптическая информационно-измерительная система на основе бинарных оптомеханических датчиков дифференциального типа [Текст] / В.А. Зеленский // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза. - 2009. - Т.1. - с. 35-37.

7. Зеленский, В.А. Система контроля состояния объекта на основе оптомеханических датчиков с растровым элементом [Текст] / В.А. Зеленский // Труды Пятой Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». -СПб. - 2008. Т. 12. – С.437-438.

8. Павлов, А.Н. Принятие решений в условиях нечеткой информации [Текст] / А.Н. Павлов, Б.В. Соколов. – М.:ГУАП, 2006. – 72 с.

DIFFERENTIAL BYNARY OPTICAL-MECHANICAL SENSORS FOR AUTOMATED MANAGEMENT AND CONTROL SYSTEMS

© 2012 D. V. Korban

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

Considered are the peculiarities of their design and application binary optical-mechanical sensors differential type for the automated control systems and control. Analyses advantages and disadvantages of this decision, the conditions of use of sensors, made the calculation of the information capacity of the system. It is shown that the modes of operation of the sensor to the effect of a number of operational factors.

Binary optic-mechanical sensor differential type, coding unit, matrix of permissible code combinations.

Информация об авторе

Корбан Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: gearbox@yandex.ru. Область научных интересов: элементы систем управления и контроля.

Korban Dmitriy Vladimirovich, post-graduate student of electronics system and devices department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: gearbox@yandex.ru. Area of research: units of management and control systems.

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

№ 7 (38)

2012

Корректоры: **И. И. Спиридонова, Е. А. Молчанов**
Компьютерная вёрстка: **В. С. Бозриков, А. А. Лапин**
Переводчик: **Р. О. Мишанов**

Каталожная цена: 1000 руб

Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 24,3.
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. Аншаков¹, В. В. Бирюк², В. В. Васильев², В. В. Никонов², В. В. Салмин²

¹ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС»

²Самарский 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. Anshakov¹, V. V. Biruk², V. V. Vasiliev², V. V. Nikonov², V. V. Salmin²

¹FSUE SRPSRC "TsSKB-Progress"

²Samara 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)