

# ТРА

## ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



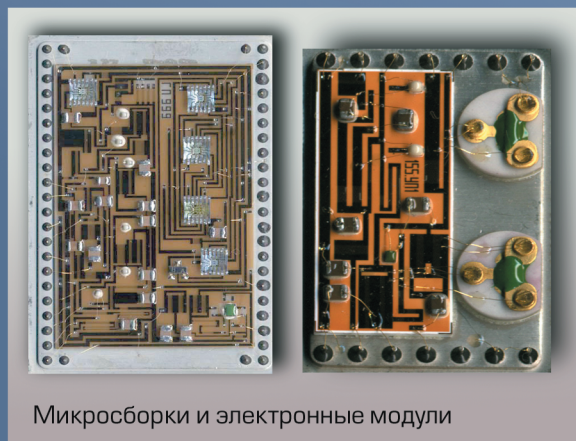
Датчики контроля уровня жидкости



Полупроводниковые газовые  
сенсоры



Цифровые  
преобразователи угла



Микросборки и электронные модули



Акустоэлектронные изделия

К статье  
*«На технологическом направлении»*

# 5 2003

СЕНТЯБРЬ — ОКТЯБРЬ



# Украинский проспект электроники

К участию приглашаются  
предприятия — исследователи, разработчики, производители  
электронных систем и средств различного назначения,  
компонентов и материалов,  
а также предприятия и организации,  
представляющие инфраструктуру электроники.

e-mail: [tkea@odessa.net](mailto:tkea@odessa.net)  
<http://www.tkea.wallst.ru/elektroniks.html>

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ»



Журнал издается при поддержке  
Министерства промышленной  
политики Украины,  
НПП «Сатурн» (г. Киев),  
НПП «Карат» (г. Львов),  
СКБ «Молния»,  
Политехнического университета  
(г. Одесса),  
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)  
и других предприятий и организаций

### ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

Отделения связи Украины. «Каталог видань України». Индекс 23785.

Отделения связи России. Каталог «Пресса России». Индекс 71141.

Отделения связи стран СНГ. Подписные каталоги. Индекс 71141.

Подписное агентство «Идея», [www.idea.com.ua](http://www.idea.com.ua),  
тел./факс +038 (062)381-09-32. Индекс 11146.

Подписное агентство «KSS», [www.kss.kiev.ua](http://www.kss.kiev.ua),  
тел. +038 (044)464-02-20. Индекс 20363.

Редакция «ТКЭА». Украина, 65005, г. Одесса, ул. Прохоровская, 45.  
E-mail <[tkea@odessa.net](mailto:tkea@odessa.net)>, тел. (048)733-72-83, тел./факс (048)733-67-91.

Редакция: А. А. Ефименко, Е. Н. Курдюкова, Л. М. Лейдерман,  
А. Н. Онищенко, Е. А. Тихонова, М. С. Хлопова.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корецкая.

Подписано к печати 29.10 2003 г. Формат 60×84 1/8.

Печать офсетная. Печ. л. 7,5. Уч.-изд. л. 9,6. Тираж 700 экз. Заказ № 53.

Издательство «Нептун-Технология»

(65028, г. Одесса, ул. Б. Хмельницкого, 59).

Отпечатано в типографии издательства «ТЭС»

(65012, г. Одесса, ул. Канатная, 81/2).

ТЕХНОЛОГИЯ  
И  
КОНСТРУИРОВАНИЕ  
В  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Учредитель АО "Нептун"

2003

Год издания 27-й

№ 5

Год регистрации 1992

СОДЕРЖАНИЕ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

*К.т.н. Н. М. Вакив*  
*Д.т.н. П. П. Воробийченко*  
*Д.т.н. В. Н. Годованюк*  
*К.т.н. А. А. Дашиковский*  
*Д.т.н. В. П. Малахов*  
*В. А. Мингалёв*  
*Д.т.н. В. Б. Ткаченко*  
*Е. А. Тихонова*  
*К.т.н. В. М. Чмиль*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Д.т.н. А. Л. Вайнер*  
*К.т.н. Э. Н. Глушеченко*  
*Д.т.н. В. Т. Дейнега*  
*Д.т.н. Ю. А. Долгов*  
*Д.ф.-м.н. В. А. Дроздов*  
*К.т.н. И. Н. Еримичой,*  
*зам. гл. редактора*  
*К.т.н. А. А. Ефименко,*  
*Д.ф.-м.н. А. Н. Золотко*  
*Д.ф.-м.н. Ф. Д. Касимов*  
*Л. М. Лейдерман,*  
*отв. секретарь редакции*  
*Д.т.н. С. Ю. Лузин*  
*Д.т.н. Л. С. Лутченков*  
*К.т.н. О. Н. Негоденко*  
*К.т.н. Ю. Е. Николаенко*  
*Д.ф.-м.н. В. В. Новиков*  
*К.т.н. В. И. Попов,*  
*гл. редактор*  
*К.т.н. В. В. Рюхтин*  
*К.т.н. В. В. Сибиряков*  
*Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк*

АДРЕС РЕДАКЦИИ

Украина, 65005, Одесса-5,  
ул. Прохоровская, 45  
Тел. (+38-048) 733-72-83  
Тел./факс (+38-048) 733-67-91  
E-mail: tkea@odessa.net  
Web-сайт: tkea.wallst.ru

Международный стандартный  
серийный номер  
ISSN 0130-6243

Регистрационный номер  
КВ 2092 от 07.06.96 г.

Регистрация в ВАК по разделам  
"Физико-математические науки",  
"Технические науки":

Бюллетень ВАК Украины, 1999, № 4

Техническая политика

Информационно-аналитическая система Национального космического агентства Украины. *Колесник В. И., Смаглюк В. В., Волох К. Ф., Куцарь А. Д.* 3  
Перспективы развития и применения микроэлектронной негатроники. *Касимов Ф. Д.* 5

Проектирование. Конструирование

Рациональный учет паразитных элементов электронных модулей при их конструировании. *Николаенко В. М., Ефименко А. А., Симонов В. В., Николаенко О. В.* 9  
Непереборный метод определения полярности выходов при минимизации многовыходных автоматов. *Лузин С. Ю., Полубасов О. Б.* 13  
Малогабаритный полосовой электромеханический фильтр. *Паэранд Ю. Э.* 16  
Электроника и экология  
Автоматизированный многокомпонентный контроль выбросов промышленных объектов в атмосферу. *Гейко О. Н., Ахмедзянов И. Ш., Цвельх Ю. М.* 18

Биомедицинская электроника

Радиометрия СВЧ-диапазона: медицинские аспекты использования. *Колисниченко М. В., Куценко В. П., Скрипник Ю. А., Яненко А. Ф.* 23

Обеспечение тепловых режимов аппаратуры

Концептуальный алгоритм теплофизического проектирования радиоэлектронных средств. *Шелест В. И., Кондрашов А. С.* 26  
Исследование эффективности проволочного радиатора новой конструкции. *Хольвинская Л. М., Николаенко Т. Ю., Николаенко Ю. Е.* 28  
Применение метода приближенного прямого моделирования при предварительных испытаниях теплообменников. *Базелев Б. П., Быкадоров В. В., Ефремов В. И., Храмова Л. Ф.* 32

Оптоэлектроника

Область повышенных шумов преобразования в фоторезисторах. *Головко А. Г.* 35

Термоэлектрические устройства

Критериальный подход к выбору режима работы термоэлектрического охлаждающего устройства. *Зайков В. П., Киншова Л. А., Быкадоров В. В., Храмова Л. Ф.* 37

Технология производства

Применение контролируемого анодного окисления для экспресс-контроля в технологии пленок и тонкопленочных структур. *Лебедева Т. С., Шпилевой П. Б., Войтович И. Д.* 42

Методы удаления полимерных загрязнений, вызванных плазмохимическим травлением. *Иванчиков А. Э., Кисель А. М., Медведева А. Б., Плебанович В. И., Пономарь В. Н., Шиколо В. Е.* 46

Управление импульсным режимом в гальванотехнике. *Стевич З., Райчич-Вуясинович М., Стоилькович З.* 51

Материалы электроники

Механизм регулярных формоизменений микропроволоки при воздействии токовых нагрузок. *Моисеев Л. М., Ковальчук В. В.* 53

К истории науки и техники

На технологическом направлении. К 55-летию ОАО «Авангард» (г. С.-Петербург) *Шубарев В. А.* 58  
Издательству "Радио и связь" 85 лет. 60

Выставки. Конференции 12, 41

Библиография

Новые книги 15, 34, 50, 52, 57  
В портфеле редакции 36, 41

Науково-технічний журнал

ТЕХНОЛОГІЯ ТА КОНСТРУЮВАННЯ

ВЕЛЕКТРОННІЙ АПАРАТУРІ

(російською мовою)

## ЗМІСТ

**Технічна політика**

Інформаційно-аналітична система Національного космічного агентства України. *В. І. Колесник, В. В. Смаглюк, К. Ф. Волох, О. Д. Куцарь* (3)  
Перспективи розвитку та застосування мікроелектронної негatronіки. *Ф. Д. Касімов* (5)

**Проектування. Конструювання**

Рациональне урахування паразитних елементів електронних модулів при їх конструюванні. *В. М. Ніколаєнко, А. А. Єфіменко, В. В. Симонов, О. В. Ніколаєнко* (9)  
Неперебірний метод визначення полярності виходів при мінімізації багатовихідних автоматів. *С. Ю. Лузін, О. Б. Полубасов* (13)  
Малогабаритний смуговий електромеханічний фільтр. *Ю. Е. Паєранд* (16)

**Електроніка та екологія**

Автоматизований багатокomпонентний контроль викидів промислових об'єктів у атмосферу. *О. М. Гейко, І. Ш. Ахмедзянов, Ю. М. Цвєлих* (18)

**Біомедицинська електроніка**

Радіометрія НВЧ-діапазону: медичні аспекти використання. *М. В. Колісниченко, В. П. Куценко, Ю. О. Скрипник, О. П. Яненко* (23)  
**Забезпечення теплових режимів апаратури**  
Концептуальний алгоритм теплофізичного проектування радіоелектронних засобів. *В. І. Шелест, А. С. Кондрашов* (26)

Дослідження ефективності д्रोного радіатора нової конструкції. *Л. М. Хольвінська, Т. Ю. Ніколаєнко, Ю. С. Ніколаєнко* (28)

Застосування методу наближеного прямого моделювання при попередніх випробуваннях теплообмінників. *Б. П. Базєлев, В. В. Бікадоров, В. І. Єфремов, Л. Ф. Храмова* (32)

**Оптоелектроніка**

Область підвищених шумів перетворення у фоторезисторах. *А. Г. Головка* (35)

**Термоелектричні пристрої**

Критеріальний підхід до вибору режиму роботи термоелектричного охолоджуючого пристрою. *В. П. Зайков, Л. О. Кіншова, В. В. Бікадоров, Л. Ф. Храмова* (37)

**Технологія виробництва**

Застосування контрольованого анодного окислення для експрес-контролю в технології плівок та тонкоплівкових структур. *Т. С. Лебєдєва, П. Б. Штільовий, І. Д. Войтович* (42)  
Методи видалення полімерних забруднень, які викликані плазмохімічним травленням. *О. Е. Іванчиков, А. М. Кисель, А. Б. Медведєва, В. І. Плебанович, В. М. Пономар, В. Є. Шукіло* (46)  
Керування імпульсним режимом в гальванотехніці. *З. Стєвіч, М. Райчич-Вуясинович, З. Стоїлькович* (51)

**Матеріали електроніки**

Механізм регулярних формозмін мікродроту під дією токових навантажень. *Л. М. Моїсєєв, В. В. Ковальчук* (53)

**З історії науки та техніки**

На технологічному напрямку. До 55-ї річниці ВАТ "Авангард" (м. С.-Петербург). *В. О. Шубарев* (58)  
Видавництво "Радио и связь" 85 років. (60)

## CONTENT

**Technical polytic**

Information analytical system of Ukrainian National space agency. *Kolesnik V. I., Smaglyuk V. V., Volokh K. Ph., Kutzar A. D.* (3)  
Prospects of development and application of micro-electron negatronics. *F. D. Kasimov* (5)

**Designing. Construction**

Guaranteeing of electronic modules functional properties while their constructing. *Nikolayenko V. M., Yefimenko A. A., Simonoff V. V., Nikolayenko O. V.* (9)  
Non-enumerational method of outputs polarity determining in multioutput finite state machines minimization. *Luzin S. Yu., Polubasov O. B.* (13)  
Small-sized bandwidth electromechanical filter. *Paerand Yu. E.* (16)

**Electronic and ecology**

Creation of the automatic complexes for industry exhaust monitoring. *Geyko O. N., Ahmedzyanov I. S., Tsvelyh J. M.* (18)

**Biomedical electronics**

Microwave radiometry: using for medical purpose. *Kolisnichenko M. W., Kutsenko V. P., Skrypnik Yu. A., Yanenko O. P.* (23)

**The temperature conditions assurance of equipment**

Conceptual algorithm for electronic equipment thermo-physical designing. *Shelest V. I., Kondrashov A. S.* (26)

Research of efficiency of wire radiator of new design. *Kholvinskaya L. M., Nikolaienko T. Yu., Nikolaienko Yu. E.* (28)

The use of the method of approximate direct modeling during the heat exchanger preliminary test. *Bazelev B. P., Bykadorov V. V., Efremov V. I., Khranova L. F.* (32)

**Optoelectronics**

Area of the raised (increased) noise in photoresistors. *Golovko A. G.* (35)

**Thermoelectric devices**

The choice of thermoelectric cooling device working regime using different sets criteria. *Zaykov V. P., Kinshova L. A., Bykadorov V. V., Hramova L. F.* (37)

**Production technology**

Using of controlled anodic oxidation for express-control in films and thin-films structures technologies. *Lyebedeve T. S., Shpylovyi P. B., Voytovych I. D.* (42)  
Methods of the post-etch contamination removal. *Ivanchykau A. E., Kisel A. M., Medvedeva A. B., Plebanovich V. I., Ponomar V. N., Shukulo V. Ye.* (46)

Control of pulse regime in galvanotechnics. *Stevic Z., Rajcic-Vujasinovic M., Stojilkovic Z.* (51)

**Materials of electronics**

Mechanism of the regular form changed of a microwire subjected extreme current to loadings. *Moiseev L. M., Kovalchuk V. V.* (53)

**To a history of a science and engineering**

On the technological direction. To the 55th anniversary of open joint-stock company "Avangard". *Shubarev V. A.* (58)  
The publishing house "Radio and communication" ["Радио и связь"] 85 years. (60)

**Уважаемый Читатель!**  
**Сентябрь этого года был отмечен важным событием — подписанием в Ялте руководителями Беларуси, Казахстана, России и Украины Договора о едином экономическом пространстве. Впереди еще обсуждения парламентариями, однако налицо еще один шаг на пути к тесному сотрудничеству.**

**Большая политика диктуется экономикой, экономика — особенно в индустриальных странах — во многом определяется состоянием науки и техники, характером научно-технической политики, которая всегда тяготела и будет тяготеть к сотрудничеству.**

**Любой научно-технический журнал — и элемент научно-технической сферы, и ее инструмент, и ее результат. И возможен он только на фундаменте сотрудничества.**

**Номер, который сейчас перед Вами, уважаемый Читатель, — очередной плод сотрудничества многих и многих людей. И тех, чьи имена в титрах журнала, и тех, кто им помогал. Этот номер готовился авторами и рецензентами в азербайджанском Баку, в белорусском Минске, в литовском Вильнюсе, в российских Москве, Нижнем Новгороде и Санкт-Петербурге, в украинских Запорожье и Киеве, Одессе и Черновцах, в югославских Белграде и Боре.**

**Сотрудничество — это естественно.**

**Редакция приглашает Вас, уважаемый Читатель, к активному сотрудничеству. Уже сейчас.**

В. И. КОЛЕСНИК, к. т. н. В. В. СМАГЛЮК, К. Ф. ВОЛОХ, А. Д. КУЦАРЬ

Украина, г. Харьков, Научно-исследовательский и проектный институт «Союз»;  
г. Киев, Национальное космическое агентство Украины  
E-mail: Victoriya@soyuztele.com

Дата поступления в редакцию  
02.06 2003 г.

## ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НАЦИОНАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО АГЕНТСТВА УКРАИНЫ

*Информация, получаемая от космических систем, должна оперативно использоваться при решении широкого круга задач.*

Одним из приоритетных направлений государственной политики в области космической деятельности является создание и поддержание космическими средствами и способами современного единого информационного пространства Украины. Это может быть достигнуто посредством эффективного использования научно-технического и производственного потенциала и создания условий для широкого внедрения космических технологий в отрасли экономики.

Информация, получаемая от космических систем, должна оперативно использоваться при решении широкого круга задач. В этих целях в космической отрасли создается информационно-аналитическая система, призванная стать интегратором информационных ресурсов и инструментом поддержки принятия решений.

Национальное космическое агентство Украины (НКАУ) обозначило основные требования к создаваемой информационно-аналитической системе: предоставление руководству НКАУ, руководству других министерств и ведомств целевой тематической информации. При этом имеется в виду, что предоставляемая информация будет использоваться при решении таких задач, как:

- экологический мониторинг по широкому спектру проблем;
- контроль и предотвращение чрезвычайных ситуаций природного или техногенного происхождения на территории Украины;
- обеспечение текущей деятельности экономики;
- обеспечение национальной безопасности и обороны страны.

**И**нформационно-аналитическая система НКАУ (ИАС НКАУ) представляет собой функционально и территориально распределенную систему, включающую в себя такие основные структурные единицы:

- Информационный центр, г. Киев;
- Аналитический центр, разнесенный территориально и расположенный в Центрах приема и обработки космической информации;

— Инструментальный стенд, г. Харьков.

*Информационный центр* осуществляет функции административного и методологического управления ИАС НКАУ, определяет объекты контроля и параметры их мониторинга, обеспечивает предоставление руководству НКАУ и целевым потребителям обобщенной информации по всем задачам мониторинга, формирует заказы и запросы для реализации их в ИАС НКАУ.

Объектами контроля для создаваемой системы могут являться природные, техногенные объекты, населенные пункты, экологические объекты, аграрные, лесные, водные и другие ресурсы Украины.

*Аналитический центр* осуществляет прием, предварительную и целевую обработку космических и других исходных данных, анализ и хранение полученных данных, создание, ведение и поддержание баз данных ИАС НКАУ, формирование отчетов, прогнозов и предупреждений, выдачу их в Информационный центр для последующего предоставления заказчикам или потребителям.

*Инструментальный стенд* осуществляет обработку основных принципов и технологий функционирования создаваемой ИАС, отработку взаимодействия ее составных частей, организацию и отработку функционирования телекоммуникационного оборудования, апробирование и отработку существующих и вновь создаваемых методик и технологий, применяемых при тематической и комплексной обработке космических данных, при создании отчетов и прогнозов.

Источниками информации для создаваемой ИАС являются:

- космические аппараты отечественного и зарубежного производства;
- системы наземной датчиковой сети экологического мониторинга;
- средства контроля космического пространства;
- существующие отечественные и международные базы данных, включая архивы данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) прошлых лет, данные из Интернет, базы данных существующих ведомственных систем мониторинга, базы данных по различным тематическим направлениям, на основании которых возможно создание методик тематической обработки или методик формирования прогнозов и предупреждений.

**В** состав создаваемой информационно-аналитической системы НКАУ входят следующие основные подсистемы:

- подсистема сбора и передачи информации;
- подсистема тематической обработки данных;
- подсистема комплексного анализа данных;
- подсистема хранения, архивации и баз данных.

*Подсистема сбора и передачи информации* предназначена для сбора и передачи данных от источников информации ИАС НКАУ, для обеспечения стыка между ИАС НКАУ и смежными системами, а также для осуществления связи между структурными элементами ИАС НКАУ.

В состав подсистемы сбора и передачи информации входит телекоммуникационное оборудование, которое обеспечивает предоставление на базе существующих в отрасли и вновь развертываемых средств связи основных телекоммуникационных услуг (передача данных, речевая связь) абонентам, разнесенным территориально или функционально.

Подсистема сбора и передачи информации в части телекоммуникационного оборудования будет построена с использованием современных и перспективных телекоммуникационных технологий: цифровых систем коммутации, синхронных и плезиохронных волоконно-оптических систем мультиплексирования и передачи. В состав оборудования будут входить программно-аппаратные средства:

- предоставления инфокоммуникационных услуг;
- доступа к сетевым ресурсам;
- интегрированной сети речевой связи и передачи данных;
- первичной сети;
- автоматизированного управления связью.

Архитектура сети связи, создаваемая на базе телекоммуникационного оборудования, открыта к наращиванию и будет обеспечивать добавление в случае необходимости новых функциональных элементов, таких как сеть подвижной транкинговой связи, сеть подвижной спутниковой связи, сети радиодоступа и т. п., без изменения существующих функциональных элементов.

Телекоммуникационное оборудование подсистемы сбора и передачи информации ИАС НКАУ будет предоставлять следующий набор услуг связи:

- 1) Диалоговые службы.
- 2) Службы с накоплением.
- 3) Службы по запросу.

Состав услуг будет уточняться в процессе выполнения работ по созданию ИАС НКАУ.

*Подсистема тематической обработки* предназначена для тематической обработки данных, полученных от источников информации ИАС НКАУ. Тематическая обработка осуществляется при помощи соответствующего программного обеспечения (ПО), в том числе специального.

Состав ПО, используемого в системе, определяется форматами информации, подлежащей обработке (данные ДЗЗ, РЛС, данные сейсмо- или других типов датчиков и др.), видом тематической задачи, подлежащей решению, и алгоритмом ее решения.

Основные виды тематических задач, решаемых ИАС НКАУ:

- задачи экологического мониторинга, кризисного мониторинга или прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера;
- метеорологическое обеспечение наземного комплекса в интересах планирования и применения космических систем;
- сейсмический контроль, контроль потенциально опасных объектов и пр.

Результаты решения тематических задач могут быть использованы в качестве входных данных для комплексной обработки информации в ИАС НКАУ.

*Подсистема комплексного анализа* данных обеспечивает:

- анализ тематически обработанных данных;
- определение текущих параметров тематической задачи;
- определение тенденций изменения этих параметров;
- визуализацию результатов решения тематической задачи;
- ситуационное и пространственное моделирование данных;
- предоставление в Информационный центр результатов комплексной обработки данных в виде отчетов, прогнозов, рекомендаций, используемых для поддержки принятия решений.

В ИАС НКАУ посредством использования программного обеспечения геоинформационных систем появляется возможность комплексного анализа большого объема пространственно распределенных данных. Геоинформационные системы за счет очень гибкой структуры, сильной математической платформы и мощных аналитических возможностей, а также возможности пространственного представления и распределения данных, позволяют:

- осуществлять привязку полученных результатов к координатам посредством электронной карты местности с заданной точностью;
- создавать тематические слои;
- проводить комплексный анализ полученных данных с учетом создаваемых информационных слоев;
- создавать сложные математические модели, имитирующие реальный мир путем объединения многих слоев информации;
- обеспечивать выработку экспертами прогнозов, рекомендаций и предупреждений на основе комплексного анализа и имитационных моделей.

Геоинформационная система — интегрируемая технология, которая может получать из несовместимых данных общую карту отображения. Наложение слоев различных данных позволяет интегрировать тематическую информацию и получать посредством этого обобщенную информацию, что позволяет отслеживать динамику процессов, исследовать явления в их развитии.

*Подсистема хранения, архивации и баз данных* должна обеспечивать:

- разграничение прав доступа к данным, что позволит отдельным структурным или функциональным

единицам ИАС НКАУ обрабатывать только ту часть данных, за которую они ответственны;

— удобный интерфейс доступа к данным или предоставления информации для лиц, которые ответственны за данную информацию или за принятие решений;

— возможность удаленного централизованного управления распределенными узлами хранения данных;

— соблюдение установленных правил целостности данных для всей базы данных;

— возможность архивации всей информации, хранящейся в базе данных, с необходимой периодичностью;

— восстановление данных в случае сбоев системы или повреждения данных.

В состав ИАС НКАУ входит и ряд обеспечивающих подсистем.

*Подсистема автоматизированного управления* обеспечивает оперативное управление, автоматизацию процессов доставки информации по каналам передачи данных, автоматизацию отдельных мероприятий по подсистемам защиты информации и подсистемам эксплуатации.

*Подсистема обеспечения безопасности и целостности передачи информации* предназначена для обеспечения безопасности передачи информации в процессе функционирования ИАС НКАУ посредством мер организационного и технического характера. В рамках работ по подсистеме защиты информации должны быть определены виды конфиденци-

альной информации, объекты, где эта информация архивируется, информационные направления, по которым должна передаваться конфиденциальная информация, определены конкретные меры организационного и технического характера, препятствующие утечке информации.

*Подсистема диагностики и состояния технических средств* обеспечивает диагностирование состояния и поддержание нормального режима работы технических средств системы, обеспечивает возможности реконфигурации технических средств при решении тематических задач, требующих дополнительных технических ресурсов, и т. п.

*Подсистема эксплуатации и ремонта* обеспечивает проведение технического обслуживания и текущего ремонта.

\*\*\*

Создаваемая информационно-аналитическая система НКАУ позволит обеспечить реализацию основных направлений в развитии инфраструктуры и функциональных возможностей космической отрасли Украины. ИАС НКАУ позволит посредством использования передовых информационных технологий обеспечить эффективное использование научно-технического потенциала космической отрасли, обеспечит создание условий для внедрения космических технологий в отрасли национальной экономики посредством использования для решения тематических задач данных, получаемых от космических средств.

*Д. ф.-м. н. Ф. Д. КАСИМОВ*

Азербайджан, г. Баку, Национальное аэрокосмическое агентство  
E-mail: ssddb@azerin.com

Дата поступления в редакцию  
17.07 2003 г.

Оппонент *к. ф.-м. н. К. В. КОЛЕЖУК*  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ НЕГАТРОНИКИ

*Показаны успехи негатроники. Изложен взгляд на перспективы использования микроэлектронной негатроники, в том числе бионегатроники.*

В последнее время благодаря усилиям научных школ России, Украины и Азербайджана сформировалось и успешно развивается новое направление функциональной электроники — негатроника [1].

Впервые формулировка научного направления негатроники была дана на Всесоюзных научно-технических семинарах по приборам с отрицательным сопротивлением, проводившихся в 1980-х годах в Москве под руководством автора первой монографии по этому направлению, профессора С. А. Горяинова [2]. Окончательное уточнение терминологии, определение задач и целей негатроники произошло в октябре 1991 г. в Баку, на 1-й (и последней, по причине распада СССР) Всесоюзной конференции «Приборы с отрицательным сопротивлением и интегральные преобразователи на их основе», в которой, несмотря на тревожное время,

участвовали ученые из более чем 20 городов СССР [3]. Большая заслуга в развитии негатроники принадлежит школам проф. Филинюка Н. А. (Винницкий технический университет) и Негоденко О. Н. (Таганрогский радиотехнический университет), во многом благодаря работам которых негатроника прошла в своем развитии два этапа — полупроводниковый и схмотехнический.

В настоящее время совместными усилиями упомянутых выше школ и ученых Азербайджанского национального аэрокосмического агентства (АНАКА) развивается новое направление данной отрасли — микроэлектронная негатроника [4—6]. О последних достижениях и перспективах развития этого направления докладывалось на 4-й Международной научно-практической конференции по современным информационным и электронным технологиям, проходившей в мае 2003 г. в Одессе [7].

**Н**ачало развития твердотельной негатроники было положено открытием эффекта отрицательного сопротивления (ОС) и переключения в стеклообразных полупроводниках [8—10]. В дальнейшем

большой вклад в исследование пленочных элементов и структур внесли также азербайджанские ученые [11—14]. Однако область применения стеклообразных полупроводников ограничивается нестабильностью электрических характеристик, сложностью точного воспроизведения нужного состава многокомпонентного материала, деградацией омических контактов вследствие разъедания их со стороны халькогенидных материалов и, наконец, нестыковкой параметров и технологии изготовления с кремниевой микроэлектронной технологией.

Дальнейшему развитию микроэлектронной негatronики послужила разработка технологии одновременного выращивания моно- и поликристаллических пленок кремния в едином процессе эпитаксиального наращивания на общей подложке [15]. Наличие области пространственного заряда на границах зерен пленок поликристаллического кремния (ППК), обусловленной захватом носителей на глубокие ловушки, и возможность управлять размерами зерен и степенью их легирования при выращивании пленок технологическим путем позволяют получать широкий набор физических свойств и функциональных возможностей [16].

Пленки толщиной 5—10 мкм выращиваются в хлоридном процессе на кремниевых подложках *p*-типа проводимости (КДБ-10), на которых с помощью окисления и фотолитографии предварительно формируются локальные участки SiO<sub>2</sub> с нанесенной на них затравкой, представляющей собой тонкие слои ППК (~100 Å), осажденные в силановом процессе. При промышленном хлоридном эпитаксиальном выращивании пленки легируются фосфором до концентрации 2·10<sup>15</sup>—10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup>, что соответствует величине, необходимой для изготовления в монокристаллических участках элементов логических или линейных ИС. При этом на участках SiO<sub>2</sub> с затравкой растут локальные ППК. Размеры зерен формируемых ППК и, соответственно, концентрацию легирующей примеси в них можно варьировать температурой осаждения затравки в силановом процессе в диапазоне 800—860°C.

При исследовании ВАХ локальных ППК со средней концентрацией легирующей примеси в них был обнаружен эффект ОС и бистабильного переключения с памятью [17].

При измерении ВАХ сразу после выращивания переключение было моностабильным: при достижении некоторого порогового напряжения порядка 80—120 В на ВАХ появлялся участок ОС S-образного типа, симметричный относительно полярности приложенного смещения. После электрической формовки, заключающейся в пропускании импульсов тока, ВАХ приобретали диодный характер, при этом пороговые напряжения уменьшались на порядок, а сам эффект становился бистабильным и полярно-зависимым — переход из низкоомного состояния в высокоомное и обратно происходил при противоположных полярностях смещения.

Согласно известным представлениям, проводимость ППК определяется проводимостью объема зерен и межзеренных прослоек. Часть примесных атомов сегрегируется на границах зерен и остается

электрически нейтральной, оставшиеся примесные атомы распределяются в объеме зерен и ионизируются. Существующие на границах зерен глубокие ловушки захватывают свободные носители, создавая потенциальные барьеры, ограничивающие проводимость и подвижность носителей.

Путем исследования статических и динамических ВАХ переключающих ППК, температурной зависимости проводимости и холловской подвижности носителей заряда было показано, что эффекты памяти и переключения обусловлены процессами релаксации и перезарядки глубоких ловушек, существующих на границах зерен ППК [18].

В отличие от приборов на аморфных стеклообразных полупроводниках, пороговые напряжения которых зависят от числа переключений, ППК обладали устойчивым пороговым напряжением, не зависящим от номера включения при наработке более чем 10<sup>8</sup> переключений. Хранение элементов в течение нескольких лет при отключенном питании в высокоомном ( $R_{bc}$ ) и низкоомном ( $R_{nc}$ ) состояниях не привело к изменению электрических сопротивлений в пределах погрешности измерения, причем отношение  $R_{bc}/R_{nc}$  превосходило три порядка [19].

При исследовании вольт-фарадных характеристик (ВФХ) на мосте полных проводимостей Л2-7 в диапазоне частот 0,465—10 МГц было обнаружено, что при определенных напряжениях емкость меняет свой знак с положительного на отрицательный, т. е. происходит инверсия характера реактивной проводимости с емкостного на индуктивный [20]. Как известно, отрицательная емкость  $C^-$  и индуктивность связаны между собой следующим соотношением [21]:

$$L = R^2 C^2 / (1 + Q_L^2), \quad (1)$$

где  $Q_L$  — добротность индуктивности.

Как было нами показано в [22], из (1) следует, что

$$\left. \begin{aligned} L &= 1/\omega^2 C^- \text{ при } Q_L \gg 1 \\ L &= R^2 C^- \text{ при } Q_L \ll 1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При значениях  $Q_L$ , близких к 1, точные значения  $L$ , соответствующие измеренным значениям отрицательной емкости, можно определить из выражения (1). Табличные значения индуктивности ППК, приведенные в [22], показывают, что локальные поликремниевые пленки могут использоваться в качестве реактивных элементов твердотельных ИС.

В [22] и [23] было описано явление исчезновения под влиянием света участка ОС на ВАХ ППК, для восстановления которого требовалось увеличение приложенного напряжения смещения. Этот эффект также обусловлен наличием глубоких ловушек на границах зерен ППК, захватывающих носители зарядов, рожденные под влиянием света, что повышает высоту потенциальных барьеров и исключает условия возникновения ОС.

Воздействие света на параметры негatronов и возможность управления ими — оптонегатронный эффект — обсуждался в [24]. Разработка оптонегатронных элементов дает возможность создавать управляемую светом генерацию электрических колебаний, на основе которой можно строить оптические системы дистанционного управления.

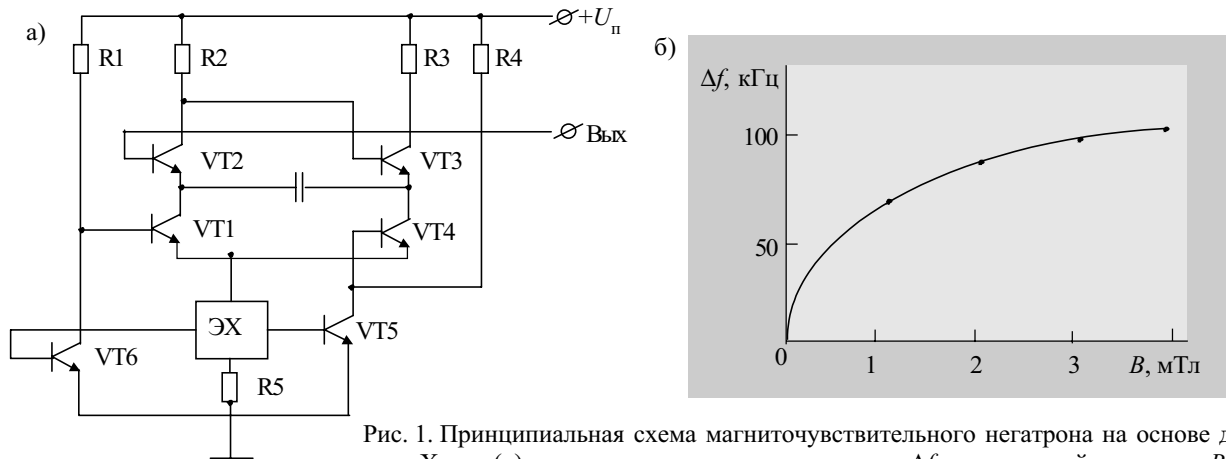


Рис. 1. Принципиальная схема магниточувствительного негatrona на основе датчика Холла (а) и зависимость изменения частоты  $\Delta f$  от магнитной индукции  $B$  (б)

Сочетание в едином кристалле чувствительных элементов, созданных в ОКБ космического приборостроения АНАКА, со схемами аналогов негatronов кафедры МЭТ БИС Таганрогского государственного радиотехнического университета позволило в рамках межгосударственного научно-технического сотрудничества создать микроэлектронные негatronные преобразователи неэлектрических величин [25—29].

Показанная на рис. 1 гибридная магниточувствительная ИС со схемой негatrona содержит элемент Холла (ЭХ), включенный в автогенератор на транзисторном аналоге негatrona. Направление магнитной индукции выбрано таким образом, что с ее увеличением частота возрастает. При увеличении магнитной индукции на 0,4 мТл частота изменялась на 40% своего первоначального значения.

В датчике магнитного поля на гальваномагнито-рекомбинационном (ГМР) эффекте сенсором служат два полупроводниковых резистора, изолированных обратносмещенным  $p-n$ -переходом и разделенных между собой узкой поликремниевой полоской (дифференциальный ГМР-элемент) [28]. Для получения чувствительного элемента на кремниевой подложке  $p$ -типа после формирования полоски из  $\text{SiO}_2$  с затравкой в едином эпитаксиальном процессе выра-

щивается пленка  $n$ -типа толщиной 10 мкм с локальной ППК над  $\text{SiO}_2$ . Топология дифференциального ГМР-элемента показана на рис. 2, а на рис. 3 приведена микрофотография кристалла магниточувствительной ИС на основе ГМР с линейным выходом.

Двухэлектродная конструкция, в отличие от четырехэлектродного датчика Холла, обеспечивает высокую стабильность характеристик — ввиду отсутствия временных и температурных дрейфов под влиянием перераспределения упругих механических напряжений во время нагревания в процессе протекания рабочих токов. Усиленные схемой сигналы с ГМР-элемента подаются на негatronную схему, описанную в [25], благодаря чему эти функциональные элементы способны передавать на расстояние информацию о величине магнитных полей в месте измерения.

В [30] приведено большое число применений магниточувствительных датчиков, которые могут служить индикаторами конечного положения, углового и линейного перемещения, направления скорости вращения, расхода жидкости и газа, бесконтактного переключателя, измерителя тока и напряжения и др. Информация о всех этих величинах может быть передана на расстояние с помощью негatronных устройств, а микроэлектронная технология позволит сделать их дешевыми, надежными и миниатюрными, т. е. при-

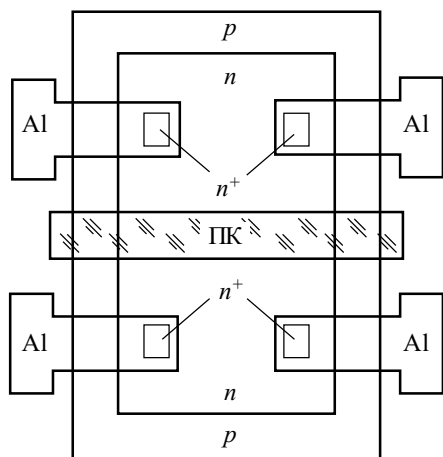


Рис. 2. Топология дифференциального ГМР-элемента

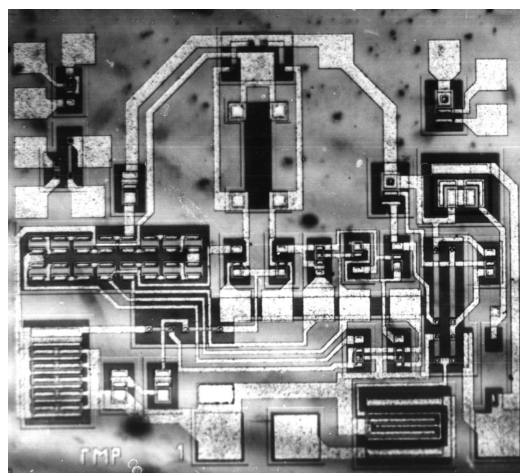


Рис. 3. Кристалл магниточувствительной ИС на основе ГМР с линейным выходом

годными для эффективного решения задач дистанционного зондирования.

**К**аковы дальнейшие перспективы развития микроэлектронной негатроники? Это, прежде всего, создание негасенсоров различных физических величин и интегральных преобразователей на их основе с частотным выходом в едином интегральном исполнении.

Существенные результаты следует ожидать в области СВЧ-техники, где повышение частотного диапазона может быть связано с применением полупроводниковых индуктивностей на ППК в твердотельных ИС [24].

Негатроны остаются также одними из перспективных элементов по созданию принципиально новых процессоров на базе нейристорных функциональных схем, развитие которых может послужить началом новой ветви негатроники — бионегатроники, способной, на наш взгляд, на основе единого закона — положительной обратной связи — объединить такие разные процессы, как, например, ударная ионизация в твердых телах, самовозбуждение в психике человека или неуправляемое поведение толпы.

Подобно тому, как кибернетика является наукой об управлении в механических системах и живых организмах на основе отрицательной обратной связи, бионегатроника станет ветвью кибернетики по изучению условий управления процессами генерации в организмах и обществе на основе положительной обратной связи.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Гаряинов С. А. и др. Негатроника. — Новосибирск: Наука, 1995.
2. Гаряинов С. А., Абезгауз И. Д. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением. — М.: Энергия, 1970.
3. Филинук Н. А. Негатроника — достижения и перспективы // Тез. докл. Всесоюз. НТК "Приборы с отрицательным сопротивлением и интегральные преобразователи на их основе". — Баку, 1991. — С. 11—17.
4. Касимов Ф. Д., Агаев Ф. Г., Филинук Н. А. Физико-технические и схемотехнические особенности проектирования микроэлектронных преобразователей на основе негатронов. — Баку: Элм, 1999.
5. Касимов Ф. Д., Гусейнов Я. Ю., Негоденко О. Н., Румянцев К. Е. Микроэлектронные преобразователи на основе негатронных элементов и устройств. — Баку: Элм, 2001.
6. Касимов Ф. Д. Микроэлектронная негатроника — новое направление функциональной электроники // Микросистемная техника. — 2003. — № 4. — С. 6—9.
7. Касимов Ф. Д. Состояние и перспективы развития твердотельной негатроники / Тр. 4-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии». — Одесса. — 2003. — С. 311.
8. Коломиец Б. Т., Лебедев Э. А., Таксами И. А. Основные параметры переключателей на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников // ФТП. — 1969. — № 5. — С. 731—735.
9. Орешкин П. Т., Глебов А. С., Петров И. М. Элементы и ячейки памяти на основе аморфных полупроводников // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. — 1973. — Т. 16, № 4. — С. 81—86.
10. Пат. 3271546 США. Переключающий прибор / С. Р. Овшинский. — 1986.
11. А. с. 599684 СССР. Полупроводниковый переключатель с памятью // Г. Б. Абдуллаев, А. Л. Шабалов, А. Г. Абдуллаев, Т. К. Исмаилов — 1978.
12. Алиев Н. А., Тагиев Б. Г., Мамедов Г. М. Остаточная проводимость и отрицательное дифференциальное сопротивление N- и S-типа в GaSeSn / В кн.: Физические свойства сложных полупроводников. — Баку: Элм, 1983. — С. 48—54.
13. Искендер-заде З. А., Ахундов М. Р., Джафарова Э. А. Электрические свойства Al—SiO<sub>2</sub>—nSi-структур // Докл. АН СССР. — 1978. — № 7. — С. 17—21.
14. Алекперова Ш. М., Ветхов В. А., Гаджиева Р. С. и др. Эффекты отрицательного сопротивления и переключения пленочных структур МДП и МПМ // Радиотехника. — 1986. — № 2. — С. 32—35.
15. Abdullayev A. G., Kasimov F. D., Mamikonova V. M. The simultaneous growth of mono- and polycrystalline silicon films with controlled parameters // Thin Solid Films. — 1984. — Vol. 115, N 3. — P. 237—243.
16. Касимов Ф. Д. Физические свойства и функциональные возможности локально выращенных пленок моно- и поликристаллического кремния // Тез. докл. 12-й Всесоюз. конф. по микроэлектронике. Ч. 2. — Тбилиси. — 1987. — С. 175—176.
17. Гезалов Б. А., Касимов Ф. Д., Ветхов В. А. Электрическая неустойчивость в локально выращенных пленках поликристаллического кремния // Письма в ЖТФ. — 1983. — Т. 9, вып. 24. — С. 1523—1526.
18. Касимов Ф. Д., Кучис Е. В., Мамиконова В. М. и др. Исследование механизма переключения ППК с помощью эффекта Холла // Литовский физический сборник. — 1990. — Т. 30, № 1. — С. 67—71.
19. А. с. 1077519 СССР. Полупроводниковый переключатель / Ф. Д. Касимов, Б. А. Гезалов, Т. К. Исмаилов и др. — 1983.
20. Kasimov F. D. Inductivity phenomenon in local polycrystalline silicon films // Thin Solid Films. — 1986. — Vol. 138, N 1. — P. 43—47.
21. Дешевой А. С., Гасанов Л. С. О твердотельной индуктивности в аморфных и компенсированных полупроводниках // ФТП. — 1977. — Т. 11, вып. 10. — С. 1995—1999.
22. Касимов Ф. Д., Рагимов М. Р. Негатронные элементы на основе локальных пленок поликристаллического кремния // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2002. — № 1. — С. 53—56.
23. Касимова Ф. Ф., Джавадов Н. Г. Стимулированное светом отрицательное сопротивление в кремниевых p—n-переходах с поликристаллической базой // Известия вузов. Сер. Электроника. — 1999. — № 1—2. — С. 47—51.
24. Филинук Н. А. Оптонегатроны и их применение / Тр. 4-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии». — Одесса. — 2003. — С. 320.
25. Касимов Ф. Д., Негоденко О. Н., Касимова Ф. Ф. и др. Негатронный преобразователь магнитного поля для дистанционных измерений // Сб. тр. Междунар. НТК «Приборостроение». Ч. 2. — Винница—Симеиз. — 1997. — С. 275.
26. Бедуев В. Л., Негоденко О. Н., Мардамшин Ю. П. Микроэлектронные трансдьюсеры магнитного поля с частотным выходом // Тез. докл. Всерос. НТК «Теория цепей и сигналов». — Таганрог. — ТРТУ. — 1996. — С. 56.
27. Сеченов Д. А., Мамиконова В. М., Василенко А. Л. Гальваномангниторекомбинационный кремниевый интегральный преобразователь // Известия вузов. Сер. Электроника. — 2001. — № 2. — С. 71—74.
28. Касимов Ф. Д., Гусейнов Я. Ю. Кремниевый интегральный гальваномангниторекомбинационный элемент // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2000. — № 5—6. — С. 16—18.
29. Негоденко О. Н., Мардамшин Ю. П. Микроэлектронные датчики с частотным выходом на основе аналогов негатронов // Там же. — С. 19—22.
30. Бараночников М. Л. Микромагнитоэлектроника. — М.: ДМК Пресс, 2001.

Д. т. н. В. М. НИКОЛАЕНКО, к. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО,  
к. т. н. В. В. СИМОНОВ, к. т. н. О. В. НИКОЛАЕНКО

Дата поступления в редакцию  
14.07 2003 г.

Украина, Одесский национальный политехнический ун-т  
E-mail: kpra@rtf.ospu.odessa.ua

Оппонент к. т. н. А. С. КОНДРАШОВ  
(ЦПМиМ СПбО РАН, г. С.-Петербург)

## РАЦИОНАЛЬНЫЙ УЧЕТ ПАРАЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ПРИ ИХ КОНСТРУИРОВАНИИ

*Предлагаются два подхода к обеспечению функциональных свойств электронных модулей с учетом влияния особенностей их конструкторской реализации.*

Основной задачей создания новых электронных модулей различного назначения является обеспечение их функциональных свойств в рамках определенной конструкторской реализации. Вместе с тем любому варианту конструкции электронных модулей (печатной плате, плате поверхностного монтажа, гибридной толсто пленочной или тонко пленочной ИС и др.) присущи паразитные элементы, в частности, распределенные в пространстве емкости и индуктивности [1]. Многообразие форм таких элементов и их описания приведены в ряде работ, в частности, в [2, 3].

В настоящей работе предложен рациональный учет влияния паразитных элементов на функциональные характеристики модулей при их проектировании.

Наиболее распространенными из паразитных элементов конструкций электронных модулей можно считать структуры, приведенные на **рис. 1**.

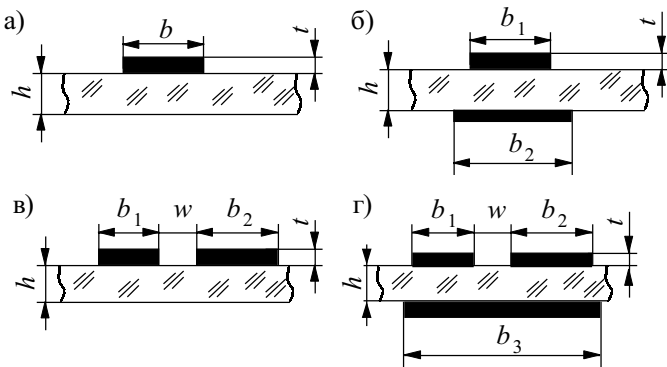


Рис. 1

Аналитические описания параметров этих структур регламентируются ОСТ 4.ГО.010.009 и опубликованы в работах [4—6].

Используя для простоты применения этих описаний их полиномиальную аппроксимацию на основе метода гладкой кривой [7], получаем следующие зависимости.

Индуктивность  $L$  для варианта рис. 1, а описывается выражением [3, с. 92]

$$L = L_{\text{пог}} l, \quad (1)$$

где  $L_{\text{пог}}$  — погонная индуктивность, нГн/мм —

$$L_{\text{пог}} = \sum_{k=0}^3 a_k b^k;$$

$a_k$  — коэффициент;  
 $b$  — ширина проводника, мм;  
 $l$  — длина проводника, мм.

Для  $b \geq 0,2$  мм и  $t = 0,05$  мм коэффициенты  $a_k$  ( $k = 0,3$ ) принимают следующие значения:  $a_0 = 1,916107$ ,  $a_1 = -5,696810 \cdot 10^{-1}$ ,  $a_2 = 1,026150 \cdot 10^{-1}$ ,  $a_3 = -5,981123 \cdot 10^{-3}$ .

Величина емкости  $C$  для варианта рис. 1, б может быть определена с помощью следующего соотношения [1, с. 148]:

$$C = C_{\text{пог}} l \epsilon^*, \quad (2)$$

где  $C_{\text{пог}}$  — погонная емкость, пФ/мм —

$$C_{\text{пог}} = \sum_{k=0}^3 d_k \alpha^k;$$

$d_k$  — коэффициент;  
 $\alpha = h/b_1$ ;  
 $h$  — толщина подложки (платы), мм;  
 $b_1$  — ширина верхнего проводника, мм;  
 $l$  — длина проводников, мм;

$\epsilon^* = 0,5(\epsilon_d + \epsilon_n)$ ;  
 $\epsilon_d, \epsilon_n$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика (воздуха, лака), подложки (платы), соответственно.

Для  $b_1 = b_2$  и  $h/b_1 \geq 0,2$  значения коэффициентов  $d_k$  ( $k = 0,3$ ) записываются следующим образом:  $d_0 = 6,159423 \cdot 10^{-2}$ ;  $d_1 = -6,321903 \cdot 10^{-2}$ ;  $d_2 = 2,288700 \cdot 10^{-2}$ ;  $d_3 = -2,477977 \cdot 10^{-3}$ . Для случая  $b_2 \geq 3b_1$  имеем:  $d_0 = 7,210831 \cdot 10^{-2}$ ;  $d_1 = -6,411777 \cdot 10^{-2}$ ;  $d_2 = 2,223319 \cdot 10^{-2}$ ;  $d_3 = -2,356979 \cdot 10^{-3}$ .

Емкость  $C$  для варианта рис. 1, в описывается формулой (2) со следующим представлением  $C_{\text{пог}}$ :

$$C_{\text{пог}} = \sum_{k=0}^3 g_k \beta^k, \quad (3)$$

где  $g_k$  — коэффициент;  
 $\beta = w/b_1$ ;  
 $w$  — расстояние между проводниками, мм.

Коэффициенты  $g_k$  принимают значения  $g_0 = 2,469371 \cdot 10^{-2}$ ,  $g_1 = -1,393143 \cdot 10^{-2}$ ,  $g_2 = 4,395322 \cdot 10^{-3}$ ,  $g_3 = -4,682092 \cdot 10^{-4}$  для  $b_1 = b_2$ , а для  $b_2 \geq 3b_1$  их можно описать в виде  $g_0 = 2,830172 \cdot 10^{-2}$ ;  $g_1 = -1,606446 \cdot 10^{-2}$ ;  $g_2 = 5,469429 \cdot 10^{-3}$ ;  $g_3 = -5,981431 \cdot 10^{-4}$ .

Взаимоиндуктивность  $M$  (нГн) между проводниками для этого же варианта структуры описывается выражением [1, с. 146]

$$M = 0,2l \left[ \ln l + \sum_{k=0}^3 p_k \gamma^k \right], \quad (4)$$

где коэффициент  $p_k$  принимает значения  $p_0=1,636665$ ,  $p_1=-1,987409$ ,  $p_2=3,381906 \cdot 10^{-1}$ ,  $p_3=-1,848080 \cdot 10^{-2}$ , а  $\gamma = w+0,5(b_1+b_2)$ .

Для конструкции рис. 1,  $z$  взаимноиндуктивность  $M$  представима в виде [6, с. 83]

$$M = 0,2l \left[ \gamma/h + \ln l + \sum_{k=0}^3 q_k \gamma^k \right], \quad (5)$$

где  $q_0=2,636666$ ,  $q_1=-1,987409$ ,  $q_2=3,381906 \cdot 10^{-1}$ ;  $q_3 = -1,848080 \cdot 10^{-2}$ .

Емкость  $C$  для этого случая описывается аналогично соотношению (2) с представлением  $C_{\text{пор}}$  следующим образом [4, с. 80]:

$$C_{\text{пор}} = 34 / [v(v+2) \cdot \varphi(\mu) \cdot (\varphi(\mu) + 0,175v)], \quad (6)$$

где  $v=2w/b$ ;  $\varphi(\mu) = \sum_{k=0}^3 u_k \mu^k$ ;  $\mu=2h/b$ ;  $b=b_1=b_2$ ;

$u_0=2,670401$ ;  $u_1=-7,699293 \cdot 10^{-1}$ ;  $u_2=7,969450 \cdot 10^{-2}$ ;  $u_3=-2,365636 \cdot 10^{-3}$ .

Дополнительные описания емкостей, индуктивностей и взаимноиндуктивностей можно найти в [1—6].

Учет влияния описанных в (1)—(6) паразитных элементов (а также элементов на основе других конструктивных вариантов [2, 4, 5]) при проектировании электронных модулей можно осуществлять посредством двух подходов. Первый из них требует итерационной взаимосвязи схемотехнического и конструкторского проектирования. Второй подход позволяет обеспечить решение задачи последовательно (схемотехнический анализ, затем конструкторское проектирование) — без указанной взаимосвязи. Практический интерес представляют оба подхода, поэтому рассмотрим их особенности более подробно на примере разработки конструкторской реализации диодно-транзисторной логики (ДТЛ) [8, с. 59—61] (рис. 2) в виде ГИС.

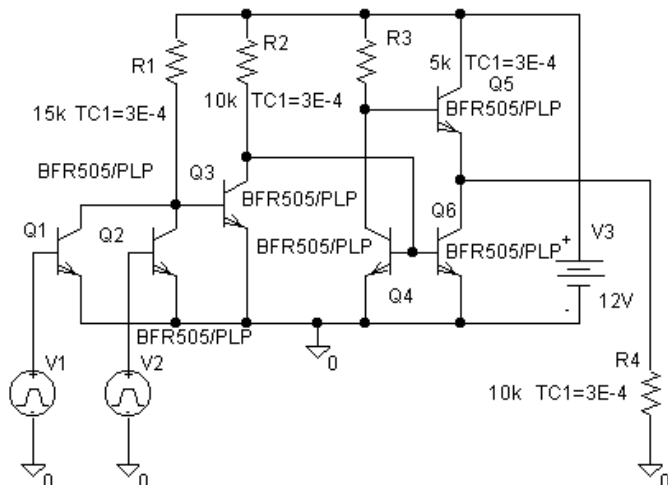


Рис. 2

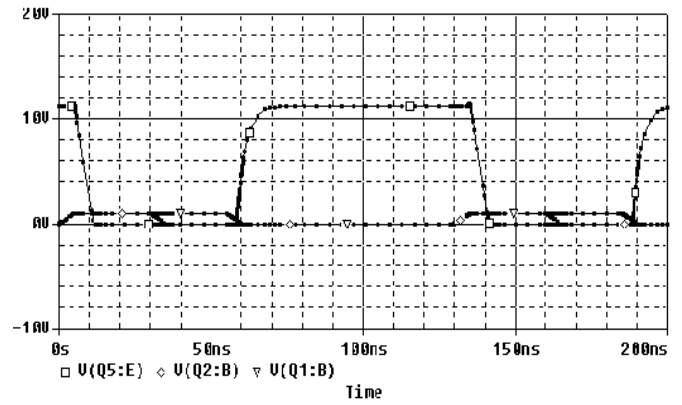


Рис. 3

Графики нормальной работы ДТЛ рис. 2 для  $t=27^\circ\text{C}$  приведены на рис. 3.

Итак, в первом подходе после отработки схемы рис. 2 со свойствами, показанными на рис. 3, проектируется топология ДТЛ на базе тонкопленочной технологии (для сокращения объема иллюстративного материала варианты топологии ГИС не приводятся). При этом для первого варианта топологии характерны паразитные элементы (см. рис. 1 и выражения (1—6)), основные из которых представлены на принципиальной схеме ДТЛ конденсаторами  $CP_i$  ( $i=1,5$ ) и индуктивностями  $LP_i$  ( $i=1,4$ ) с соответствующими их значениями (рис. 4).

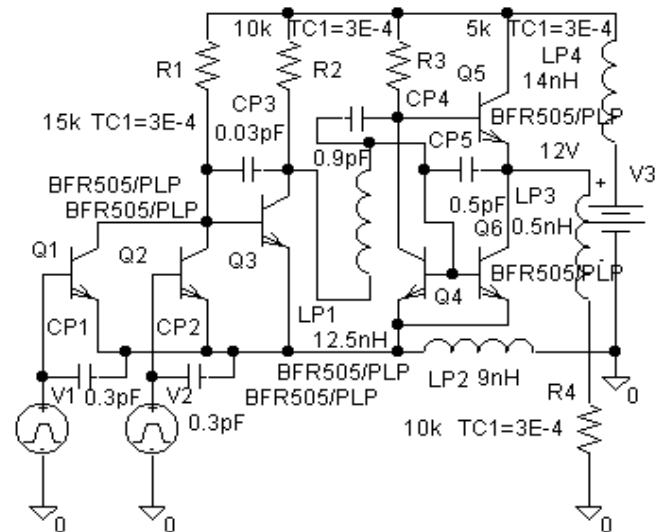


Рис. 4

Наличие отмеченных паразитных элементов обуславливает искажения выходного сигнала ДТЛ (рис. 5), что требует корректировки топологии ГИС.

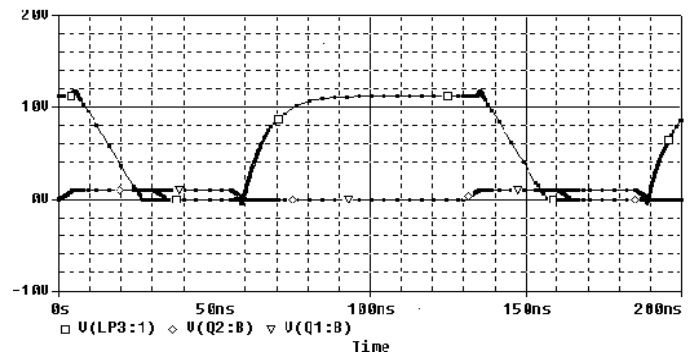


Рис. 5

Изменение топологии ГИС позволило получить следующие значения паразитных элементов —  $CP_1=0,7$  пФ;  $CP_2=0,7$  пФ;  $CP_3=0,5$  пФ;  $CP_4=0,1$  пФ;  $CP_5=0,3$  пФ;  $LP_1=11$  нГн;  $LP_2=12$  нГн;  $LP_3=5$  нГн;  $LP_4=7$  нГн, что обеспечило удовлетворительное функционирование ДТЛ (рис. 6).

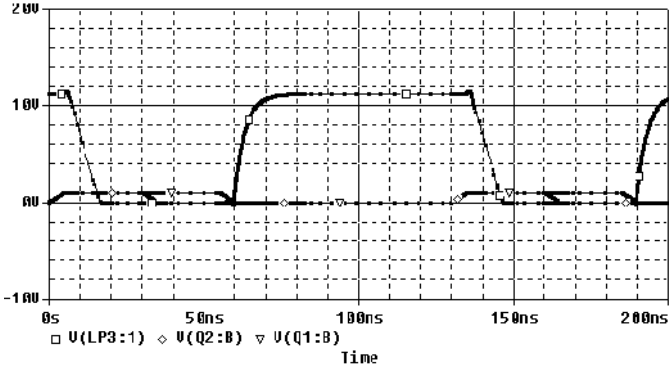


Рис. 6

Действительно, сравнение графиков рис. 3 и 6 показывает незначительное изменение в форме выходного сигнала ДТЛ, в частности, значения длительности переднего ( $\tau_{пfi}$ ) и заднего ( $\tau_{зfi}$ ) фронтов  $i$ -го варианта составляют:  $\tau_{пf1}=10$  нс,  $\tau_{пf2}=12$  нс,  $\tau_{зf1}=7$  нс,  $\tau_{зf2}=10$  нс.

Таким образом, первый подход требует итеративной корректировки топологии ГИС с последующим расчетом параметров паразитных элементов схемы (соотношения (1)–(6)) и ее анализом в среде SxСАПР.

Второй подход базируется на предварительном схемотехническом анализе схемы ДТЛ (см. рис. 2) в среде SxСАПР с учетом паразитных элементов, которые возможны при ее реализации в виде ГИС. Такая схема ДТЛ приведена на рис. 7.

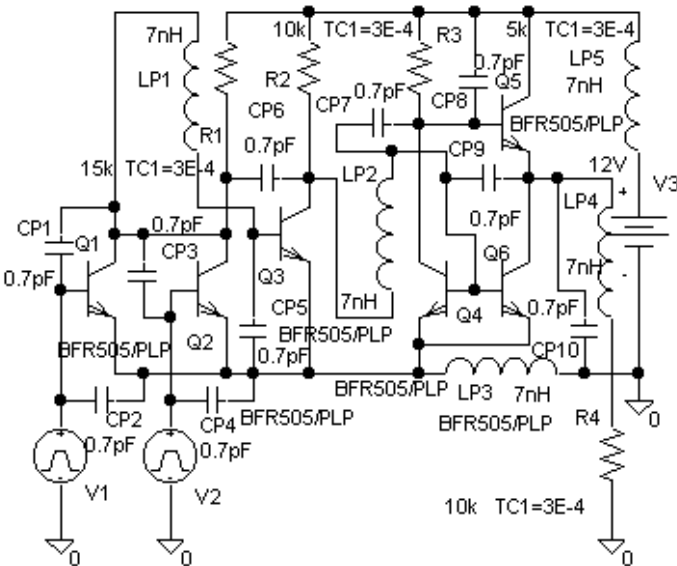


Рис. 7

Первоначальные значения паразитных параметров  $CP_i=0,7$  пФ ( $i=1,10$ ) и  $LP_i=7$  нГн ( $i=1,5$ ) (рис. 7) обуславливают значительные искажения выходного сигнала ДТЛ (рис. 8), в частности, с показателями  $\tau_{пф}=70$  нс,  $\tau_{зф}=20$  нс.

Дальнейший многовариантный анализ схемы ДТЛ рис. 7 в среде SxСАПР позволил определить следу-

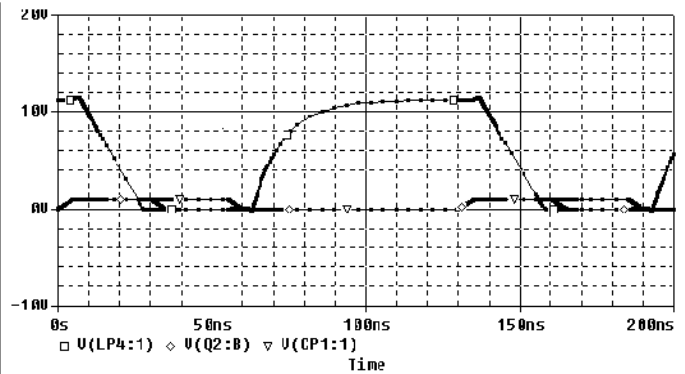


Рис. 8

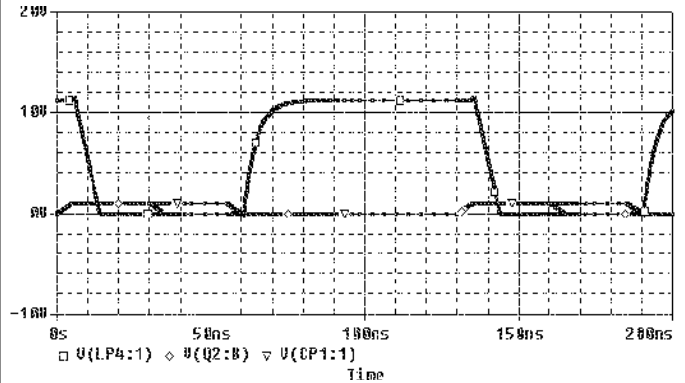


Рис. 9

ющие значения параметров паразитных элементов:  $CP_1=0,1$  пФ;  $CP_2=CP_4=CP_5=1$  пФ;  $CP_3=0,1$  пФ;  $CP_6=CP_7=CP_8=CP_9=0,1$  пФ;  $CP_{10}=0,9$  пФ;  $LP_1=14$  нГн;  $LP_2=10$  нГн;  $LP_3=17$  нГн;  $LP_4=7$  нГн;  $LP_5=9$  нГн, которые определяют допустимые искажения сигнала на R4 (рис. 9) ( $\tau_{пф}=15$  нс,  $\tau_{зф}=8$  нс).

На основании этих результатов рассчитываются соответствующие конструктивные ограничения на форму элементов топологии ГИС ДТЛ (выражения (1)–(6)). Например, для варианта рис. 1, а целесообразно рассматривать два ограничения (1):

$$l \leq \frac{L}{\sum_{k=0}^3 a_k b^k}; \quad b \leq B_i; \quad i=1,3, \quad (7)$$

где  $B_i = \Lambda_i - a_2/3a_3$ ;  $\Lambda_1 = u+v$ ;  $\Lambda_2 = \epsilon_1 u + \epsilon_2 v$ ;  $\Lambda_3 = \epsilon_2 u + \epsilon_1 v$ ;

$$\epsilon_{1,2} = -0,5 \pm j\sqrt{3}/2; \quad u = \sqrt[3]{-q + \sqrt{q^2 + p^3}}; \quad v = \sqrt[3]{-q - \sqrt{q^2 + p^3}};$$

$$q = \frac{1}{2} \left[ \frac{2a_2^3}{27a_3^3} - \frac{a_2 a_1}{3a_3^2} + \frac{a_0 l - L}{la_3} \right]; \quad p = \frac{1}{3} \left[ \frac{3a_3 a_1 - a_2^2}{3a_3^2} \right]; \quad j = \sqrt{-1}.$$

Соотношения, аналогичные (7), можно получить и для других конструктивных вариантов, приведенных на рис. 1. В ряде случаев удобно формировать ограничения по одному параметру конструкции паразитного элемента, зафиксировав остальные на уровне их минимально возможных значений с учетом ограничений современных технологий производства ГИС. При этом удобно воспользоваться известными методами и алгоритмами решения нелинейного уравнения, например, ZEROIN [9].

Другими словами, во втором подходе в процессе проектирования топологии ГИС нет необходимости

многократного обращения к СхСАПР, достаточно лишь учитывать выработанные для данной схемы конструктивные ограничения.

\*\*\*

В заключение отметим, что проектирование конструкций современных быстродействующих электронных модулей неотделимо от анализа функционирования их схем в среде СхСАПР. При этом выбор первого или второго подхода к решению указанной задачи зависит от опыта и возможностей разработчика.

Недостатком первого подхода следует считать потребность в многократной корректировке конструкции электронного модуля с учетом его функциональных характеристик. А отрицательной стороной второго подхода является необходимость предварительного многовариантного анализа схемы электронного модуля в среде СхСАПР с целью выявления возможных ограничений на его конструкцию.

Возможен также комбинированный подход, объединяющий преимущества обоих рассмотренных подходов и заключающийся в следующем. На первом этапе определяются параметры возможных паразитных элементов схемы электронного модуля, в наибольшей степени влияющих на его функциональные свойства. На втором этапе после разработки конструкции электронного модуля с учетом полученных

ограничений проводится проверочный анализ его схемы в среде СхСАПР с последующей корректировкой отдельных конструктивных особенностей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Верхопятницкий П. Д., Латинский В. С. Справочник по модульному конструированию радиоэлектронной аппаратуры.— Л.: Судостроение, 1983.
2. Горобец А. И., Степаненко А. И., Коронкевич В. М. Справочник по конструированию радиоэлектронной аппаратуры (печатные узлы).— К.: Техніка, 1985.
3. Кузмин А. Я. Конструирование и микроминиатюризация электронной вычислительной аппаратуры.— М.: Радио и связь, 1985.
4. Шерстнев В. В. Конструирование и микроминиатюризация ЭВА.— М.: Радио и связь, 1984.
5. Сборник задач и упражнений по технологии РЭА / Под ред. Е. М. Парфенова.— М.: Высш. школа, 1982.
6. Компоновка и конструкции микросистемной аппаратуры / Под ред. Б. Ф. Высоцкого, В. Б. Пестрякова, О. А. Пятлина.— М.: Радио и связь, 1982.
7. Николаенко В. М., Николаенко О. В. Аппроксимация характеристик макромоделей электронных устройств методом гладкой кривой // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 1.— С. 13—15.
8. Алексенко А. Г., Шагурин И. И. Микросхемотехника.— М.: Радио и связь, 1982.
9. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений.— М.: Мир, 1980.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



Украина, г. Одесса, 2—6 июня 2004 г.

Национальная Академия наук Украины, Министерство образования и науки Украины, Министерство промышленной политики Украины, Украинское физическое общество, Институт физики полупроводников НАН Украины, Институт радиотехники и электроники РАН, ОАО "Укрналит", Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова

п р о в о д я т

Международную научно-техническую конференцию "Сенсорная электроника и микросистемные технологии" ("СЭМСТ-1") с выставкой разработок и промышленных образцов сенсоров.

Рабочие языки конференции: украинский, русский, английский.

Научные направления конференции

- Физические, химические и другие явления, на основе которых могут быть созданы сенсоры.
- Проектирование и математическое моделирование сенсоров.
- Сенсоры физических величин.
- Оптические и оптоэлектронные сенсоры.
- Акустоэлектронные сенсоры.
- Химические сенсоры.
- Биосенсоры.
- Материалы для сенсоров.
- Технологические проблемы сенсорики.
- Сенсоры и информационные системы.
- Деградация, метрология и аттестация сенсоров.
- Микросистемные технологии (MST).

Адрес для переписки: НИЛ-3, Оргкомитет "СЭМСТ-1", ОНУ им. И. И. Мечникова, ул. Дворянская, 2, г. Одесса, 65026, Украина

Тел./факс +38(0482) 23-34-61. Лепих Ярослав Ильич.  
E-mail: ndl\_lepikh@gomail.com.ua, ndl\_lepikh@mail.ru  
<http://odnu.edu.ua/conference/physics/~>

Д. т. н. С. Ю. ЛУЗИН, к. т. н. О. Б. ПОЛУБАСОВ

Россия, г. С.-Петербург, АО "Авангард"  
E-mail: luzin1@rol.ru

Дата поступления в редакцию  
18.03 2003 г.

Оппонент к. т. н. А. А. НИКОЛЕНКО  
(ОНПУ, г. Одесса)

## НЕПЕРЕБОРНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯРНОСТИ ВЫХОДОВ ПРИ МИНИМИЗАЦИИ МНОГОВЫХОДНЫХ АВТОМАТОВ

*С высокой степенью вероятности варианту полярности, получившему минимальную оценку, будет соответствовать действительно оптимальный вариант.*

В настоящее время среди методов логического синтеза отсутствуют быстрые методы для определения, какая из двух реализаций, непосредственно функции или ее инверсии, будет более эффективной (т. е. будет содержать меньшее число термов после минимизации), что подразумевает решение обеих задач и выбор лучшего варианта. Для многовыходных устройств количество вариантов является показательной функцией числа выходов, и просмотр всех вариантов является достаточно трудоемким.

В работе [1] описан метод минимизации системы булевых функций при фиксированной полярности выходов. В настоящей работе развиваются идеи работы [1] для оценки и выбора одного из вариантов полярности, обеспечивающего минимум суммарного числа термов при минимизации системы булевых функций.

Обозначим  $I^0, I^1$  подмножества элементов  $n$ -мерного булева пространства  $I^{(n)} = \{a_0, \dots, a_{2^n-1}\}$ , на которых полностью определенная булева функция  $f(X) \in F$ ,  $X = \{x_0, \dots, x_{n-1}\}$  имеет соответственно нулевое и единичное значение [2, с. 25]. Системы булевых функций будем задавать в виде множества  $\Psi_0 = \{(\alpha_j, \beta_j)\}$  ( $j=1, \dots, p$ ) пар в общем случае троичных векторов. Пару  $(\alpha_j, \beta_j)$  будем называть обобщенным (на множестве функций) интервалом. Часть  $\alpha_j$  обобщенного интервала назовем входной, а часть  $\beta_j$  — выходной. Входная часть  $\alpha_j = \{\alpha_j^{n-1}, \dots, \alpha_j^0\}$  обобщенного интервала является интервалом в пространстве булевых переменных  $X = \{x_0, \dots, x_{n-1}\}$ . Выходная часть  $\beta_j = \{\beta_j^{m-1}, \dots, \beta_j^0\}$  обобщенного интервала является двоичным вектором значений функций  $f_0, \dots, f_i, \dots, f_{m-1}$  на интервале  $\alpha_j$ . При этом  $\beta_j^i = 1$ , если  $I_{\alpha_j} \subseteq I_i^1$ ;  $\beta_j^i = 0$ , если  $I_{\alpha_j} \subseteq I_i^0$ .

Задача состоит в приведении исходного множества обобщенных интервалов  $\Psi_0$ , представляющих систему булевых функций  $F$ , к кратчайшему множеству обобщенных интервалов.

### Начальное решение

Векторы  $\beta_i, \beta_j$  — выходные части обобщенных интервалов — будем сравнивать поразрядно, чтобы установить между ними следующее отношение:

если  $\forall k \in \overline{0, m-1}, \beta_i^k \leq \beta_j^k$ , то  $\beta_i \subset \beta_j$ .

Обозначим через  $I_j$  объединение интервалов  $\alpha_i$ , для которых  $\beta_i = j$  (т. е. выходные части совпадают и их числовой эквивалент равен  $j$ ):

$$I_j = \bigcup_{\beta_i=j} I_{\alpha_i}.$$

Разобьем множество обобщенных интервалов  $\Psi_0$  на классы —

$$\Psi_0 = \bigcup_{j=0}^{2^m-1} I_j$$

и осуществим минимизацию для каждого класса  $I_j$  в отдельности [3, 4].

При изменении полярности функций изменяется только код класса, при этом множество элементов в классах не меняется. Соответственно не меняется и оценка числа покрывающих данный класс интервалов. Первоначально, как и в случае с фиксированной полярностью, осуществим минимизацию каждого класса в отдельности и в качестве грубой оценки для каждого варианта полярности возьмем сумму полученных оценок за вычетом оценки класса, для которого  $\beta_i = 0$  при данном варианте полярности. Затем для каждого класса определим варианты полярности, при которых можно произвести расширение или разборку интервалов класса, приводящие к уменьшению оценки для данного класса, и на соответствующую величину уменьшим оценку для данного варианта полярности. По завершении обработки всех классов выбирается вариант полярности, имеющий минимальную результирующую оценку.

### Определение

Пару кодов  $\beta_l$  и  $\beta_k$  будем называть смежными, если:

1.  $\forall i \in \{1, \dots, m\}, \beta_l^i \leq \beta_k^i$ .
2. Ни один из кодов не состоит из одних нулей.

Будем называть правильным направлением смежности направление от кода с меньшим индексом (количеством единиц в коде) к коду с большим индексом.

Пусть мы хотим использовать для расширения интервала с кодом  $\beta_l$  интервал с кодом  $\beta_k$ . Если коды  $\beta_l$  и  $\beta_k$  изначально ортогональны ( $\exists i \in \{1, \dots, m\}, \beta_l^i \neq \beta_k^i$ ), то первое необходимое условие смежности возника-

ет только при таком изменении полярности, когда один из кодов переходит в код из одних единиц, а другой — в код из одних нулей, т. е. не удовлетворяет второму условию.

Пусть коды  $\beta_l$  и  $\beta_k$  смежны, причем  $\beta_l$  содержит меньше единиц, чем  $\beta_k$  ( $\beta_l \subset \beta_k$ ). При изменении полярности несовпадающих разрядов направление смежности меняется на обратное ( $\beta_k \subset \beta_l$ ). И в том, и в другом случае отношение смежности сохраняется при всех вариантах полярности, которые изменяют только совпадающие разряды в  $\beta_l$  и  $\beta_k$ .

Пусть коды не ортогональны и не смежны. Выделим в них ортогональные подкоды  $\beta_{l^*}$  и  $\beta_{k^*}$ :

$$\beta_{l^*}^i = \begin{cases} \beta_l^i, & \beta_l^i \neq \beta_k^i \\ *, & \beta_l^i = \beta_k^i \end{cases}$$

Отношение смежности может возникнуть только при таком изменении полярности, когда один из этих подкодов становится кодом, содержащим только нули, а другой — только единицы. При этом совпадающие позиции кодов могут принимать любые значения, кроме всех нулей. Таким образом, если в кодах совпадают  $k$  позиций, то число возможных вариантов полярности, приводящих эти коды в отношение смежности, равно  $2(2^k - 1)$ .

Например, пусть  $\beta_l = 1010100, \beta_k = 0101000$ .

Тогда ортогональные подкоды будут иметь вид

$$\beta_{l^*} = 10101**, \beta_{k^*} = 01010**,$$

и возможны 6 вариантов полярности, при которых коды становятся смежными —

( $\beta_l \subset \beta_k$ ):

$$\beta_l = 0000001, \beta_k = 1111101;$$

$$\beta_l = 0000010, \beta_k = 1111110;$$

$$\beta_l = 0000011, \beta_k = 1111111;$$

( $\beta_k \subset \beta_l$ ):

$$\beta_l = 1111101, \beta_k = 0000001;$$

$$\beta_l = 1111110, \beta_k = 0000010;$$

$$\beta_l = 1111111, \beta_k = 0000011.$$

Пусть множество обобщенных интервалов  $\Psi_0$  разбито на классы —

$$\Psi_0 = \bigcup_{j=0}^{2^m-1} I_j$$

и осуществлена минимизация для каждого класса в отдельности.

Для каждого из классов  $I_j$  получена оценка  $\theta_j$  числа покрывающих интервалов.

Пусть текущая полярность выходных сигналов считается нулевой. В качестве грубой оценки  $\Theta^k$  числа покрывающих интервалов для системы функций при некоторой полярности  $k$  возьмем сумму полученных оценок за вычетом оценки  $\theta_k$ :

$$\Theta^k = \sum_{j=0}^{2^m-1} \theta_j - \theta_k.$$

Затем рассмотрим возможность расширения интервалов некоторого класса  $I_j$  за счет использования термов из других классов. Для этого:

— определим минимальный интервал, включающий все термы класса  $I_j$ ;

— для каждого из термов, принадлежащих дополнению  $I_j$  до найденного интервала, найдем класс, в который он входит (для осуществления расширения интервалов класса  $I_j$  с использованием термов некоторого класса  $I_k$  необходимо выполнение условия смежности:  $\beta_j \subset \beta_k$ );

— для каждого из найденных классов определим функцию равнозначности:

$$\beta_{jk} = \beta_j \sim \beta_k,$$

где  $\sim$  — логический оператор эквивалентности, применяемый поразрядно. Результат логической операции равен 1, если оба операнда имеют одинаковое значение (либо оба равны 0, либо оба равны 1):

$$\beta_{jk}^i = \begin{cases} 0, & \beta_j^i \neq \beta_k^i \\ 1, & \beta_j^i = \beta_k^i \end{cases};$$

— ранжируем выделенные классы в порядке увеличения числа единиц в векторе  $\beta_{jk}$ ;

— осуществляем проверку возможности расширения интервалов класса  $I_j$  с использованием термов выделенных классов в заданном порядке, при этом, рассматривая класс  $\beta_{jk}$ , используем для расширения интервалов класса  $I_j$  также термы любого класса  $I_l$ , для которого справедливо  $\beta_{jk} \subset \beta_{jl}$ . В случае уменьшения оценки  $\theta_j$  класса  $I_j$  уменьшаем на соответствующую величину оценку для варианта полярности  $\Theta^m$ , где  $m = \beta_j \oplus \beta_{jk}$ .

*Пример*

Дана система функций:

$$f_1 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 x_2 x_3 \vee x_1 x_2 x_3 = \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee x_2 x_3;$$

$$f_2 = x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee x_1 x_2 \bar{x}_3 \vee x_1 \bar{x}_2 x_3 \vee x_1 x_2 x_3 = x_1;$$

$$f_3 = \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 \vee x_1 x_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 \vee x_1 \bar{x}_2 x_3 = x_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 x_3$$

или, в сокращенной записи:

$$f_1 = \Sigma 0, 1, 6, 7;$$

$$f_2 = \Sigma 1, 3, 5, 7;$$

$$f_3 = \Sigma 2, 3, 4, 5.$$

Получим обобщенные интервалы и разобьем их на классы:

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
|     | 001 | 011 |     |
|     | 0,6 | 1,7 |     |
| 000 | 010 | 101 | 111 |
|     |     |     |     |
|     | 100 | 110 |     |
|     | 2,4 | 3,5 |     |

Получим оценки для различных вариантов полярности (оценка текущего варианта —  $\Theta^0$ ):

$$\Theta^0 = 8; \quad \Theta^1 = 6; \quad \Theta^2 = 8; \quad \Theta^3 = 6;$$

$$\Theta^4 = 6; \quad \Theta^5 = 8; \quad \Theta^6 = 6; \quad \Theta^7 = 8.$$

Найдем минимальный интервал, включающий термы класса  $I_1$ :

$$0 \cup 6 = 6; \quad 0 \cap 6 = 0; \quad \Rightarrow \{0, 2, 4, 6\}.$$

Недостающие термы {2, 4} находятся в классе  $I_4$ .  
Определим функцию равнозначности:

$$\beta_{1-4} = \beta_1 \sim \beta_4 = \beta_2.$$

Оценка  $\theta_1$  класса  $I_1$  уменьшилась на единицу (один интервал вместо двух), соответственно, уменьшаем на единицу оценку для варианта полярности  $\Theta^m$ , где  $m = \beta_1 \oplus \beta_2 = 3$ :

$$\Theta^3 := \Theta^3 - 1 = 5.$$

Термы классов  $I_1$  и  $I_4$  взаимодополняемы до интервала {0, 2, 4, 6}, поэтому функции равнозначности идентичны.

Оценка  $\theta_4$  класса  $I_4$  уменьшается на единицу при использовании термов класса  $I_1$ . Это возможно при варианте полярности  $m = \beta_4 \oplus \beta_2 = 6$ :

$$\Theta^6 := \Theta^6 - 1 = 5.$$

Аналогично, при рассмотрении возможности расширения интервалов классов  $I_3$  и  $I_6$  на единицу уменьшаются оценки для вариантов полярности  $\theta^1$  и  $\theta^4$ , соответственно.

Дальнейшая корректировка оценок может осуществляться за счет проверки возможности “разборки” интервалов различных классов.

Термы, смежные с термами класса  $I_1$ , находятся в классах  $I_3$  и  $I_4$  ({1, 7} и {2, 4}, соответственно). Для выполнения условий  $\beta_3 \subset \beta_1$  и  $\beta_4 \subset \beta_1$  необходимо, чтобы, как минимум,  $\beta_1 = \beta_3 \oplus \beta_4$ . Соответствующий вариант полярности  $m = \beta_1 \oplus \beta_1 = 6$ :

$$\Theta^6 := \Theta^6 - 2 = 3.$$

Классы  $I_3$ ,  $I_4$  и  $I_6$  разбираются при вариантах полярности 4, 3 и 1, соответственно.

Таким образом, для четырех вариантов полярности из восьми оценка  $\Theta = 3$ .

В частности, для варианта полярности 6 (инвертируется значение второй и третьей функций) разбиение обобщенных интервалов на классы имеет вид:

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
|     | 001 | 011 |     |
|     |     |     |     |
| 000 | 010 | 101 | 111 |
| 3,5 | 2,4 | 1,7 | 0,6 |
|     | 100 | 110 |     |
|     |     |     |     |

Модифицированная система функций:

$$\bar{f}_1 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 x_2 x_3 \vee x_1 x_2 x_3 = \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee x_2 x_3;$$

$$\bar{f}_2 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 \vee \bar{x}_1 x_2 x_3 = \bar{x}_1;$$

$$\bar{f}_3 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 x_2 x_3 \vee x_1 x_2 x_3 = x_2 x_3 \vee x_2 x_3$$

или, в сокращенной записи:

$$\bar{f}_1 = \Sigma 0, 1, 6, 7;$$

$$\bar{f}_2 = \Sigma 0, 2, 4, 6;$$

$$\bar{f}_3 = \Sigma 0, 1, 6, 7.$$

Видно, что модифицированная система функций использует только три различных терма.

\*\*\*

Следует отметить, что при независимой “разборке” оценка не обязательно будет точной, причем возможна погрешность подсчета как в большую, так и в меньшую стороны. Тем не менее, с высокой степенью вероятности варианту полярности, получившему минимальную оценку, будет соответствовать действительно оптимальный вариант.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Голов А. В., Лузин С. Ю. Эффективный алгоритм синтеза многовыходных комбинационных автоматов // Технология и проектирование в электронной аппаратуре.— 1999.— № 1.— С. 39—40.
2. Ачасова С. М. Алгоритмы синтеза автоматов на программируемых матрицах.— М.: Радио и связь, 1987.
3. Лузин С. Ю. Асимптотически оптимальный метод получения простых импликант // Автоматика и выч. техника.— 2000.— Вып. 1.— С. 80—84.
4. Лузин С. Ю. Минимизация булевых функций с использованием спектра индексов // Автоматика и выч. техника.— 2001.— Вып. 3.— С. 56—63.

#### НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

#### **Крылов О. В. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТАХ.— М.: Радио и связь, 2002.— 104 с.**

Книга детально знакомит читателей с основами метода конечных элементов, начиная с изгиба балки до построения глобальных матриц жесткости упругих систем, задач теплопроводности, диффузии и определения собственных форм при колебаниях.

Построены матрицы жесткости одномерных, двумерных и трехмерных элементов. Рассмотрены конечные элементы высших порядков.

Книга предназначена для студентов и аспирантов технических университетов, инженеров и научных работников, специализирующихся в численных методах расчёта сложных технических систем.

#### **Котоусов А. С. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОСИСТЕМ.— М.: Радио и связь, 2002.— 224 с.**

Даются общие сведения о системах радиосвязи, радиолокации и радионавигации, рассматриваются специфические свойства каналов радиосвязи и их статические характеристики, вопросы оптимального обнаружения и различения сигналов. Излагаются основные принципы измерения параметров состояния объектов наблюдения в радиолокации и радионавигации, оптимальные методы выделения радиосигналов в системах передачи непрерывных сообщений. Рассматриваются задачи оптимального разделения ожидаемых и мешающих сигналов в системах радиосвязи.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению “Радиотехника”.



К. т. н. Ю. Э. ПАЭРАНД

Украина, г. Алчевск, Донбасский горно-металлургический институт  
E-mail: paerand@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
23.05 2003 г.

Оппоненты  
д. т. н. В. П. МАЛАХОВ (ОНПУ, г. Одесса),  
О. П. БАСЮК ("Нептун", г. Одесса)

## МАЛОГАБАРИТНЫЙ ПОЛОСОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР

*Предложенный фильтр, обеспечивая высокую избирательность, позволяет увеличить стойкость изделия к механическим воздействиям и на порядок уменьшить его объем.*

Габаритные размеры и масса электронной аппаратуры в значительной степени определяются успехами в области создания компонентов, т. н. элементной базы. Ее совершенствование направлено на расширение функциональных возможностей, улучшение параметров, улучшение массогабаритных показателей. Последнее чаще всего достигается за счет некоторого ухудшения показателей качества. Однако в тех случаях, когда ухудшение параметров незначительное или наиболее важным требованием является снижение габаритных размеров и массы, технические решения, позволяющие минимизировать объем и массу элемента, становятся определяющими.

Одной из ответственных функций, выполняемых элементами в электронной аппаратуре, является фильтрация сигналов. Эта задача решается использованием различного рода фильтров, отличающихся как по принципу действия, так и по характеристикам. Достаточно распространенными устройствами, принцип работы которых основан на использовании явления механического резонанса, являются электромеханические фильтры.

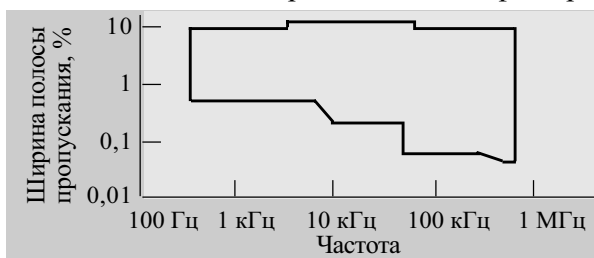


Рис. 1. Диапазон применимости электромеханических фильтров

Электромеханические фильтры характеризуются высокой избирательностью и стабильностью. Областью рационального применения электромеханических фильтров является диапазон частот от единиц до сотен кГц с обеспечением относительных полос пропускания от десятых долей и до единиц процентов (рис. 1) [1, с. 23]. Частотная область определяет вид колебаний, среди которых в равной мере используются изгибные, продольные и крутильные виды колебаний (рис. 2). При этом в области низких частот, как правило, применяются изгибные колебания.

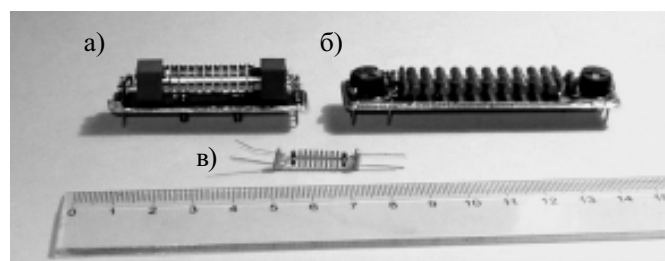


Рис. 2. Конструкции электромеханических фильтров с резонаторами, работающими на изгибных (а), крутильных (б) и продольных (в) колебаниях

При повышенных частотах более рациональным является применение продольных и крутильных колебаний. Исключение составляет конструкция, где используются резонаторы в виде дисков, соединенных между собой по образующим проволоками связей (рис. 2, а), однако в настоящее время она уже не используется ввиду больших габаритов и низкой механической прочности.

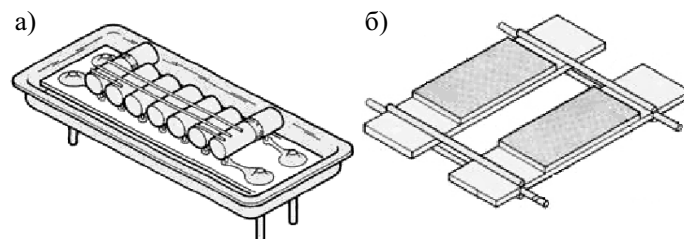


Рис. 3. Базовые конструкции ЭМФ фирмы Rockwell Collins, работающие на крутильных (а) и на изгибных (б) колебаниях

Фирма Rockwell Collins предлагает электромеханические фильтры (ЭМФ) в диапазоне частот от 5 до 525 кГц [2], обеспечивая полосу пропускания от 0,05 до 5 процентов. Указанный частотный диапазон реализуется двумя разновидностями конструкций (рис. 3). Фильтры на частоту до 100 кГц реализуют изгибные колебания (рис. 3, б), фильтры на частоту от 100 до 525 кГц — крутильные (рис. 3, а). При этом в конструкциях на частоту от 100 до 525 кГц на крутильных колебаниях работают как резонаторы, так и преобразователи.

С участием автора разработан и внедрен в серийное производство электромеханический фильтр на 128 кГц на полосу 3,1 кГц, удовлетворяющий 1/20 норм МККТТ (рис. 2, б). Данная конструкция использует крутильные колебания резонаторов и изгибные — преобразователей.

В предлагаемой статье приводятся результаты проработки технических решений, позволяющих создать серию малогабаритных электромеханических фильтров с высокой избирательностью и стойкостью к механическим воздействиям. Данный эффект получен для электромеханического фильтра на частоту 455 кГц с полосой пропускания 2,4 кГц за счет использования конструкции, резонаторы и преобразователи в которой выполнены в виде пластин и работают на продольных колебаниях растяжения-сжатия (рис. 2, в). Особенностью рассматриваемой конструкции является то, что ее резонансная система выполнена из монолитной пластины элинварного сплава и позволяет применить прогрессивную технологию, значительно снижающую стоимость изделия.

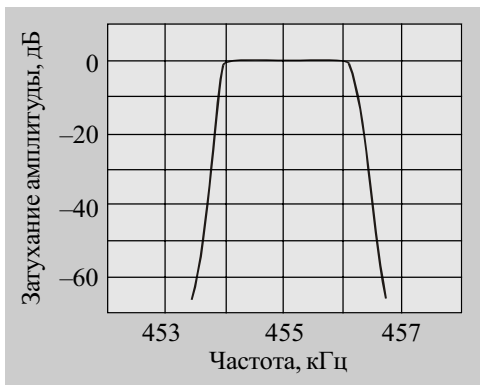


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика малогабаритного электромеханического фильтра

На рис. 4 представлена амплитудно-частотная характеристика малогабаритного фильтра. Результаты сравнения с характеристиками фильтров фирмы Rockwell Collins [3] (рис. 5, а) показывают, что коэффициент прямоугольности, рассчитанный как отношение полос по уровням 60 и 6 дБ, для малогабаритного фильтра достигает значения 1,25, в то время как для лучшего из серии фильтров, предлагаемых фирмой Rockwell Collins, он равен 1,3. При этом малогабаритный фильтр реализован в объеме  $2,2 \times 0,6 \times 0,3 = 0,4 \text{ см}^3$ , в то время как наименьший из серии фильтров Rockwell Collins занимает объем  $3,2 \times 1,25 \times 0,8 = 3,2 \text{ см}^3$ .

Сравнение величин потерь в полосе пропускания для малогабаритного электромеханического фильтра и фильтров фирмы Rockwell Collins [4] показывает, что потери для обеих разновидностей фильтров близки и составляют величину порядка 4 дБ.

Среди параметров, определяющих возможность применения фильтров в аппаратуре, является наличие в полосе задерживания паразитных сигналов. Для электромеханических фильтров это является следствием проявления механических резонансов резонаторов на частотах, отличных от номинальной, рассчитанной как средней для полосы пропускания. По данным [5], представленным на рис. 5, б, для фильтров Rockwell Collins побочные резонансы с уровнем затухания менее 40 дБ появляются на частоте 150 кГц в низкочастотной области и на частоте 750 кГц в высокочастотной области. Для малогабаритного фильтра (рис. 2, в) характерно наличие побочных резонансов при меньших отстройках от центральной частоты. Так,

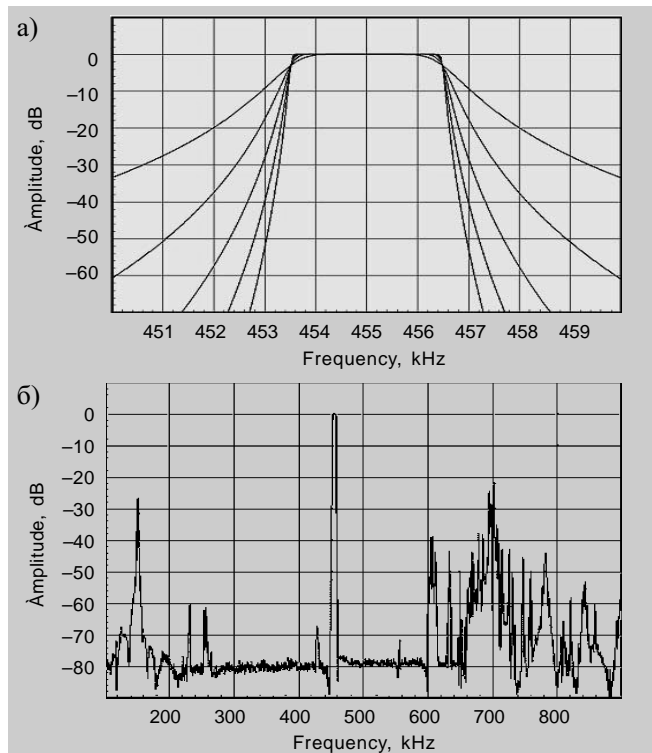


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики электромеханических фильтров, предлагаемых фирмой Rockwell Collins

побочные резонансы с уровнем затухания менее 40 дБ появляются на частоте 180 кГц в низкочастотной области и на 605 кГц в высокочастотной области.

\*\*\*

В целом, конструкция малогабаритного фильтра в монолитном исполнении, обеспечивая высокую избирательность, позволяет почти на порядок уменьшить объем изделия и создает предпосылки для повышения стойкости к механическим воздействиям. Последнее может позволить рассматриваемой конструкции не только удачно сочетаться с современной малогабаритной элементной базой, но и применяться на передвижных объектах, где эксплуатация связана с наличием значительных механических воздействий. Оценка стойкости малогабаритного электромеханического фильтра к механическим воздействиям показала, что конструкция фильтра выдерживает вибрационные нагрузки в диапазоне частот от одного до тысячи герц с ускорением 10g, однократные удары с ускорением 100g и многократные удары с ускорением 30g.

Несмотря на указанные преимущества малогабаритного фильтра, следует отметить более узкий диапазон частот, где он обеспечивает отсутствие побочных резонансов с уровнем затухания менее 40 дБ.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Джонсон Р. Механические фильтры в электронике.— М.: Мир, 1986.
2. <http://www.rockwellcollins.com/otherbusinesses/collins-filters/custom-designs/>
3. <http://www.rockwellcollins.com/otherbusinesses/collins-filters/notes/>
4. <http://www.rockwellcollins.com/otherbusinesses/collins-filters/products/>
5. <http://www.rockwellcollins.com/otherbusinesses/collins-filters/low-cost-series/index.asp?sp=526-8694-010>

О. Н. ГЕЙКО, И. Ш. АХМЕДЗЯНОВ, Ю. М. ЦВЕЛЫХ

Украина, г. Киев, УкрНИИ аналитического приборостроения  
E-mail: mil@ukranalyt.com.ua

Дата поступления в редакцию  
24.06 2003 г.

Оппоненты  
В. Ю. САВЕЛЬЕВ (НПП "Полет", г. Н.-Новгород),  
А. Н. ФОМИН ("Хартрон-ЮКОМ", г. Запорожье)

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МНОГОКОМПОНЕНТНЫЙ КОНТРОЛЬ ВЫБРОСОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В АТМОСФЕРЕ

*Описаны комплекс 306АС-01 портативных средств измерения для передвижных лабораторий и комплекс ЭК-1 стационарных средств экологического контроля.*

Организация непрерывного контроля выбросов в атмосферу на предприятиях, помимо контрольной функции, нередко помогает оптимизировать технологические процессы, тем самым обеспечивая снижение уровня выбросов и экономию топлива.

В выбросах многих промышленных объектов содержание требующих контроля газов-загрязнителей меняется в очень широких пределах. На мусоросжигающих предприятиях это происходит из-за разнородности сжигаемых отходов, трудностей оптимизации процесса сжигания, на теплоэнергетических предприятиях — из-за использования разных видов топлива с разным качеством и составом. Чтобы в таких условиях обеспечить всеобъемлющий контроль, средства этого контроля должны иметь широкий диапазон измерения и при этом измерять с необходимой точностью. При контроле выбросов предприятий с большими объемными расходами важно даже малые концентрации измерять с хорошей точностью, иначе при расчетах мощности выбросов появляются большие ошибки.

При контроле состава выбросов необходимо измерять содержание трех—шести основных газов-загрязнителей одновременно. Поэтому, с точки зрения технико-экономической эффективности использования средств контроля, наиболее целесообразно применять многокомпонентные газоанализаторы.

Вместе с тем большинство выпускаемых и патентуемых в настоящее время газоанализаторов предназначено для измерения содержания одного—трех компонентов смеси. Методы измерения, на которых они основаны (электрохимический, оптико-акустический, хемилюминесцентный, флуоресцентный, термокондуктометрический, термокаталитический, метод корреляционной ИК-спектрометрии), не позволяют создать газоанализатор, выполняющий непрерывный арбитражный контроль одновременно большого количества компонентов. Поэтому приходится создавать газоаналитические комплексы [1—9], включающие газоанализаторы с разными принципами действия, что увеличивает их стоимость и усложняет эксплуатацию.

По сравнению с перечисленными методами, инфракрасный спектроабсорбционный метод [10; 11, с. 629—675] позволяет создать средство измерения, в котором одним датчиком можно практически одновременно и непрерывно измерять содержание большого количества газовых компонентов.

В основе метода лежит закон оптического поглощения (абсорбции) Бугера—Ламберта—Бера, который для газовой однородной среды имеет вид [12, с. 301]

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp(-k(\nu)CL), \quad (1)$$

где  $I_0(\nu)$ ,  $I(\nu)$  — интенсивность излучения частоты  $\nu$  соответственно до и после прохождения среды толщиной  $L$  с концентрацией поглощающего компонента  $C$ ;

$k(\nu)$  — коэффициент поглощения для излучения частоты  $\nu$ , не зависящий от  $C$ ,  $L$ ,  $I_0$  и характерный для данного поглотителя.

Выполнив логарифмирование, получаем выражение

$$C = \ln [I_0(\nu)/I(\nu)] / k(\nu)L. \quad (2)$$

Измерение концентрации сводится к измерению величины  $\ln [I_0(\nu)/I(\nu)]$ .

Как известно, большинство газов имеет в инфракрасной области спектра набор полос поглощения, отличающихся спектральным положением и интенсивностью их максимумов. Наличие такой структуры дает возможность для каждого анализируемого компонента выбрать оптимальную по положению и интенсивности полосу поглощения с учетом наличия в смеси других компонентов и выделить нужный спектральный интервал с достаточной величиной пропускания с помощью селективных фильтров.

На основе этого метода в АО «Украналит» разработаны два аналитических спектральных комплекса — комплекс ЭК-1 стационарных средств экологического контроля и комплекс 306АС-01 портативных средств измерения для передвижных лабораторий. В газоанализаторах обоих комплексов используется многокомпонентный спектральный датчик с высокой чувствительностью — за счет использования оригинальных многоходовых оптических кювет [12, 13] с длиной оптического пути до 8 м. (Выбор оптимальной длины кюветы подробно рассмотрен в работе [14].)

Избирательность при одновременном измерении нескольких компонентов обеспечивается применением удачно выбранных узкополосных интерференционных фильтров, специально разработанных и изготовленных в НПП «Оптика» [15].

**К**омплекс экологического контроля ЭК-1 (рис. 1) предназначен для экологического мониторинга выбросов промышленных объектов в атмосферу и включает в себя от одного до четырех

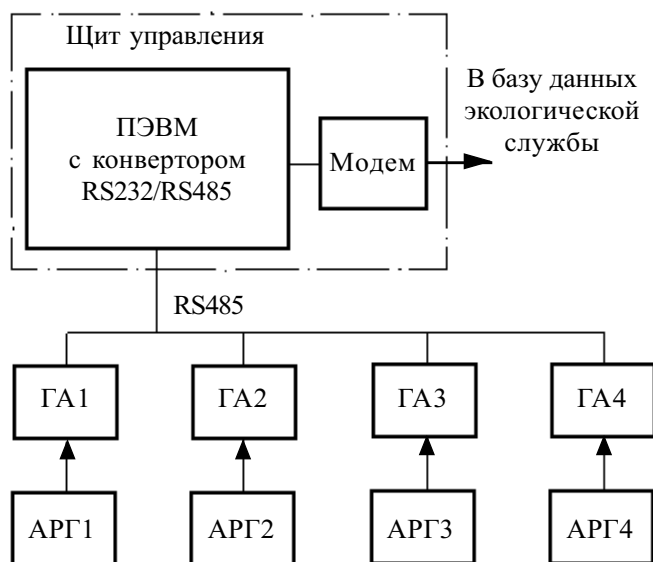


Рис. 1. Структурная схема комплекса экологического контроля ЭК-1

оптических многокомпонентных газоанализаторов “Спектр-4” (ГА) и персональную ЭВМ.

Процесс измерения полностью автоматизирован. ПЭВМ, установленная в помещении щита управления объекта, дистанционно управляет всеми газоанализаторами, выполняет обработку результатов измерения, организует индикацию на экране и архивирование данных. Связь с ЭВМ осуществляется по двухпроводному кабелю через интерфейс RS485 на расстоянии до 1200 м без повторителей и на неограниченном расстоянии с использованием повторителей.

Комплекс ЭК-1 может выполнять непрерывное измерение содержания CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> одновременно в четырех точках контроля. Такое количество каналов обеспечивает полноценный мониторинг практически всех промышленных объектов, включая теплоэлектростанции, мусоросжигающие предприятия, предприятия металлургических комплексов.

В технических решениях комплекса предусмотрена возможность расширять при необходимости его функции. Сюда входит:

- непрерывное измерение давления и температуры газов;
- измерение скорости потока в газоходе;
- вычисление объемного расхода потока;
- вычисление мощности газовых выбросов.

Для измерения объемного расхода газового потока с целью полномасштабной оценки мощности выбросов комплекс можно сопрягать с акустическим (ультразвуковым) расходомером АРГ-31 (АРГ) разработки НПО «ДАРС» (г. Днепропетровск). Он измеряет скорость потоков с погрешностью не более 2% в газоходах диаметром до 10 м, имеет аналоговый и цифровой выходы сигнала.

Метрологические характеристики комплекса контроля ЭК-1 приведены в таблице.

Комплекс ЭК-1 с газоанализаторами “Спектр-4” прошел длительные испытания и эксплуатируется на мусоросжигающем заводе “Энергия” в г. Киеве.

| Измеряемый параметр                             | Диапазон измерения              | Основная погрешность         |
|-------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Концентрация CO, г/м <sup>3</sup>               | от 0—1 до 0—15                  | **                           |
| Концентрация NO, г/м <sup>3</sup>               | от 0—1 до 0—6                   | **                           |
| Концентрация NO <sub>2</sub> , г/м <sup>3</sup> | от 0—0,2 до 0—0,6               | **                           |
| Концентрация SO <sub>2</sub> , г/м <sup>3</sup> | от 0—0,5 до 0—15                | **                           |
| Концентрация CH <sub>4</sub> , г/м <sup>3</sup> | от 0—1 до 0—5                   | **                           |
| Концентрация CO <sub>2</sub> , % об.            | 0—20                            | ±(0,10+0,05 C <sub>n</sub> ) |
| Температура газа, °C                            | от -30 до +33<br>от +33 до +800 | ± 1°C<br>± 2,0%              |
| Давление/разрежение газа, кПа                   | от 0 до ±10                     | ± 0,25 кПа                   |
| Скорость газопылевого потока, м/с               | от 3 до 30                      | Вычисляется                  |

\*\* — при измерении в поддиапазоне 0—20% от полного диапазона измерений погрешность ±10% верх него значения поддиапазона;

—при измерении в области 21—100% от полного диапазона погрешность ±10% от измеренного значения конце нтрации C<sub>n</sub>.

## На рис. 2 представлена блок-схема газоанализатора «Спектр-4».

После прогрева автоматически выполняется цикл установки нулевых показаний. По команде ЭВМ через схемы управления 25, 26 включаются насос 8 и клапан Кл1 и в многоходовую кювету 19 поступает атмосферный воздух через фильтр 7, осушитель-охладитель 9, клапан Кл2. После продувки выполняются несколько циклов измерения сигналов с приемника излучения 21, усреднение этих данных и занесение в память компьютера. Эти «нулевые» сигналы используются в дальнейшем при вычислении концентрации анализируемых компонентов до следующего цикла установки «нуля». Периодичность этой процедуры — 8 часов. При изменении температуры кюветы на 5°C и давления в ней на 1 кПа автоматически выполняется внеочередная установка «нуля».

После установки нулевых показаний клапан Кл1 переключается и в кювету 19 поступает проба по тракту “зонд—линия транспортирования—модуль осушки—насос 8—осушитель-охладитель 9—Кл2”. Клапан Кл2 служит для автоматической очистки газового тракта прибора выключением. Сначала включается клапан Кл1 и атмосферным воздухом продувается кювета 19, затем дополнительно включается клапан Кл2 и продуваются в обратном направлении модуль осушки, линия транспортирования, зонд.

Расход пробы контролируется датчиком расхода 13 на основе датчика MPX5010DP, измеряющего перепад давления на дросселе.

Излучение от излучателя 16 модулируется механическим модулятором 17, проходит через один из интерференционных фильтров в термостате 18, отражается многократно в сферических зеркалах кюветы 19 и попадает на приемник излучения 21. Используется интегрально чувствующий (от 2 до 20 мкм) пироэлектрический приемник МГ-30. Фотоэлектрические импульсные сигналы после линейного усилителя 22 поступают на синхронный детектор 23 с RC-фильтром, где преобразуются в сигналы постоянного тока и поступают на вход АЦП контроллера 24. В приборе используется контроллер 485SSDA12 фирмы V&B Electronics, поставляемый с уже записанной в него программой, выполняющей функции опроса цифровых сигналов, опроса канала АЦП, вывода управляющих сигналов по команде, принятой от ПЭВМ.

Инфракрасный излучатель с температурой T≈900 К помещен в термоизолирующий корпус с окошком из слюды. (Конструкция обеспечивает нужный нагрев малым током, быстрый выход в рабочий режим и нечувствительность к сквозняковым эффектам.) При такой температуре процесс окисления идет очень

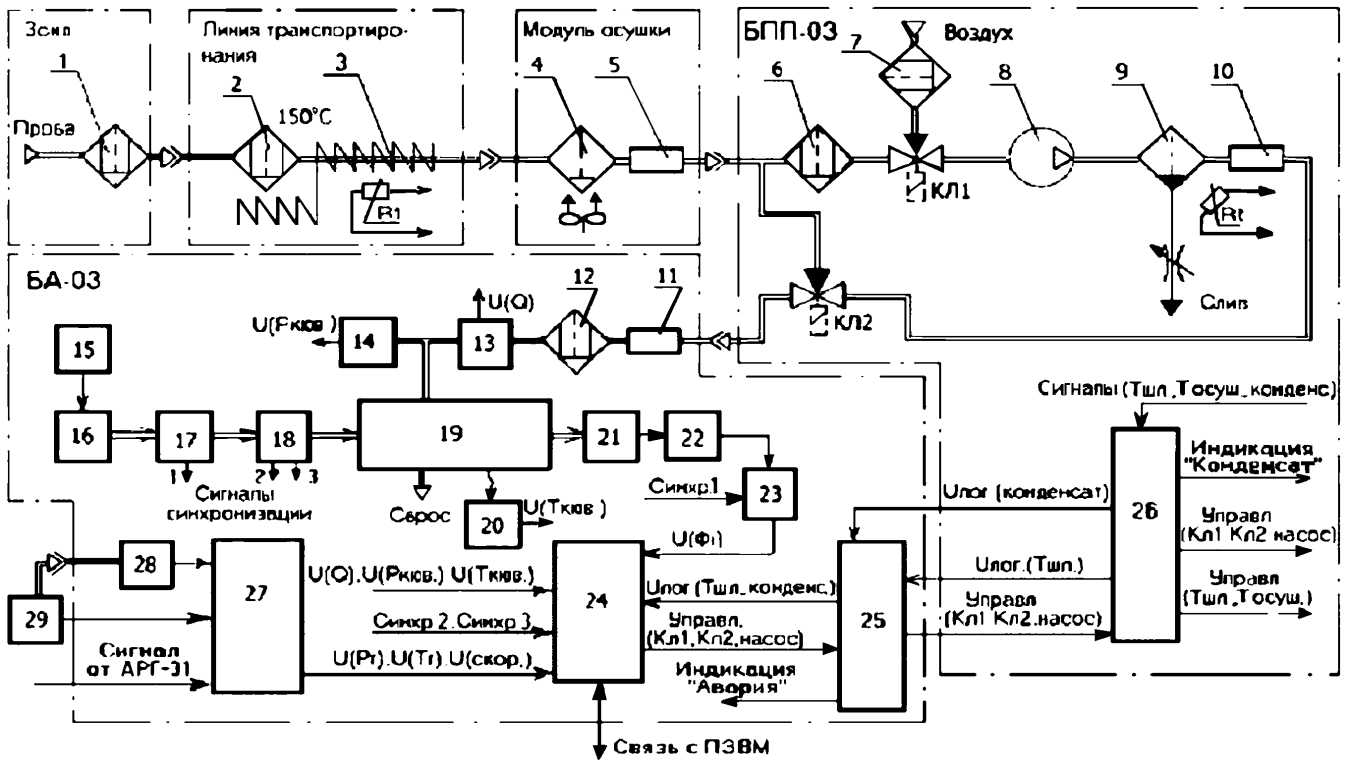


Рис. 2. Блок-схема газоанализатора «Спектр-4»

медленно и, в то же время, обеспечивается достаточная энергия лучистого потока в используемой спектральной области. Чтобы устранить влияние окисления излучателя на его спектральную характеристику, используется схема стабилизации тока 15 в цепи его питания.

Интерференционные фильтры закреплены в отверстиях диска, вращаемого электроприводом, и проходят поочередно через световой поток от излучателя. Полный оборот диск совершает за 30 с, что соответствует одному циклу измерения. Диск с фильтрами находится в термостате. Стабилизация температуры фильтров устраняет эффект смещения полосы пропускания при изменении его температуры.

Как показал опыт, этих мер оказалось достаточно, чтобы обеспечить высокую стабильность градуировочной характеристики в течение всего межповоротного интервала, что имеет первостепенное значение для арбитражных измерений.

Для повышения точности измерений применяется синхронное детектирование фотоэлектрических сигналов. Такой способ детектирования дает возможность сильно сузить полосу пропускания даже при значительной нестабильности несущей частоты и обеспечивает уверенную регистрацию слабых информационных сигналов на фоне шумов.

С целью защиты от электромагнитных помех приемник излучения и предварительный усилитель размещены на общей плате в экранирующем кожухе. Для электропитания ГА используется компьютерный источник вторичного питания, отличающийся хорошей стабилизацией, высокой надежностью, низкой стоимостью. Управление клапанами, насосом, нагревом термошланга осуществляется через устройства гальванической развязки.

Поскольку в датчике реализована однолучевая оптическая схема, в цикл измерения, кроме измерения  $n$ -го количества анализируемых компонентов с помощью  $n$  фильтров, вводится измерение на  $(n+1)$ -й длине волны с помощью  $(n+1)$ -го фильтра. Этот спектральный интервал свободен от поглощения компонентов пробы. Выходной сигнал по этому каналу используется в качестве реперного для контроля фонового поглощения и обеспечивает непрерывную корректировку показаний по  $n$  измерительным каналам в соответствии с изменением  $(n+1)$ -го реперного выходного сигнала. Такое решение позволяет компенсировать некоторые нестабильности, возникающие в схеме обработки сигнала, схемах питания, и, таким образом, повысить точность измерений.

Если в составе пробы конкретного объекта присутствуют компоненты, оптическое поглощение которых оказывает влияние на измерение какого-либо из  $n$  анализируемых компонентов, в цикл измерения дополнительно вводится измерение еще на одной или двух длинах волн с помощью интерференционных фильтров, выделяющих спектральный интервал, совпадающий с полосой поглощения, характерной только для этих мешающих компонентов. Выходные сигналы по этим каналам используются для вычисления поправок показаний в каждом цикле измерений.

Поступление сигнала на вход АЦП сопровождается синхронными импульсами, разрешающими программе запускать АЦП для считывания. Выборка данных для усреднения этого сигнала осуществляется в интервале времени  $\Delta t$ , когда через поток излучения проходит центральная зона фильтра. Синхроимпульсы служат также для распознавания фильтров.

Программа обработки измерительной информации для каждого из них производит вычисления информативного параметра  $D_i$  по формуле

$$D_i = \ln(U_i^0/U_i), \quad (3)$$

где  $U_i^0$  — значение сигнала с  $i$ -м фильтром при наполнении кюветы чистым воздухом (получен при установке «нуля»);  
 $U_i$  — значение сигнала с  $i$ -м фильтром при наполнении кюветы пробой.

Эта величина затем используется для вычисления концентрации по формуле

$$C_i = a_i D_i + b_i D_i^2 + c_i D_i^3, \quad (4)$$

где  $C_i$  — концентрация  $i$ -го компонента;  
 $a_p, b_p, c_i$  — параметры модели для  $i$ -го компонента.

В качестве параметров моделей использованы параметры полиномиальной регрессии, вычисленные по результатам градуировки. Такая модель позволяет минимизировать систематическую составляющую инструментальной погрешности прибора в широком диапазоне измеряемых концентраций.

Градуировка выполняется с помощью версии этой же программы, только в файл она записывает значения  $D_i$ . Параметры для поправок к модели для  $i$ -го измеряемого компонента по  $n$ -му мешающему компоненту получают, измеряя  $D_i$  и  $D_n$  при подаче в кювету  $n$ -го компонента различной концентрации. Чтобы минимизировать основную погрешность во всем широком диапазоне измерения, градуировка прибора выполняется по большому количеству точек концентрации с помощью генераторов поверочных газовых смесей (ПГС) 645ГР-03М и 667ГР-03М, разработанных и изготовленных в АО «Укрналит». Диапазон коэффициентов разбавления в этих генераторах от 5 до 3500 раз с относительной погрешностью разбавления не более  $\pm 2\%$ .

Как известно, при измерениях с помощью метода прямого оптического поглощения необходимо учитывать влияние температуры и давления анализируемого газа на его коэффициент поглощения [10, 16]. Способы устранения этого влияния путем термостатирования аналитической кюветы и стабилизации давления в ней громоздки и трудоемки. Авторами реализован другой способ устранения этих влияний. Прибор снабжен датчиком температуры (LM34DZ) 20 и датчиком абсолютного давления (MPX5100AP) 14 для контроля этих параметров в кювете. Сигналы датчиков поступают в компьютер, который вычисляет поправки к показаниям, используя поправочные коэффициенты, полученные по результатам предварительных спектральных исследований. Поскольку анализируемая проба выходит из кюветы непосредственно в атмосферу, давление в кювете не зависит от расхода пробы, всегда равно атмосферному давлению и изменяется очень медленно.

Для измерения температуры и давления в точке контроля служит зонд термоманометрический 29. Зонд оснащен термопарой NiCr—NiAl в герметичном чехле из нержавеющей стали и соединен эластичной трубкой с датчиком давления 28. Плата датчиков 27 служит для формирования на входе АЦП контроллера стандартных аналоговых сигналов

Для автоматизированных комплексов, работающих в круглосуточном режиме, кроме обеспечения необходимой точности измерений, не менее важно обеспечить метрологическую надежность приборов — устранение вероятности возникновения «скрытого» метрологического отказа. (Под этим подразумевается нарушение достоверности измерений по причине выхода за допустимые пределы каких-либо параметров или из-за нарушения представительности пробы при ее подготовке к анализу.)

В аналитических комплексах, представленных в этой работе, организован непрерывный контроль параметров, влияющих на достоверность измерений. Это:

- контроль правильности обмена данными между компьютером и аналитической частью комплекса;
- контроль расхода пробы с выводом сообщения о выходе за пределы нормы;
- контроль температуры кюветы, давления в ней с выводом сообщений о выходе за пределы рабочей области эксплуатации;
- контроль температуры термошланга;
- контроль работоспособности осушителей с автоматической блокировкой работы насоса при появлении конденсата в трубках газового тракта. (Для этой цели служат датчики конденсата 5, 10, 11. При замыкании их контактов каплями конденсата схема управления отключает насос и генерирует сигнал в ЭВМ для вывода на экран сообщения об отказе.)

Чтобы обеспечить достоверные измерения таких легко растворимых газов как  $\text{NO}_2$  и  $\text{SO}_2$ , система транспортирования и подготовки пробы спроектирована так, чтобы не вызывать изменений концентрации измеряемых компонентов. В газоанализаторе «Спектр-4» проба от зонда с фильтром грубой очистки 1 транспортируется к модулю осушки по гибкому обогреваемому газопроводу 3 из фторопласта с обогреваемым фильтром 2. Модуль осушки, благодаря оригинальной конструкции осушителя 4 (использование ионообменных капилляров), обеспечивает избирательное и очень быстрое удаление большей части влаги. Влагосодержание пробы снижается до уровня, соответствующего точке росы окружающего воздуха. Осушитель-охладитель второй ступени обеспечивает на выходе постоянный уровень влагосодержания, достаточно низкий, чтобы избежать конденсации влаги в аналитической кювете. Так как градуировка прибора и измерения выполняются при одном и том же влагосодержании пробы, остаточная влага не нарушает достоверности измерений.

Промышленные выбросы состоят из различных парообразных, газовых, аэрозольных компонентов, часть из которых обладает химически агрессивными свойствами. Так, в выбросах мусоросжигающих предприятий присутствуют такие очень агрессивные составляющие как пары HCl, HF. Правильный выбор материалов для элементов отбора и подготовки пробы, способов защиты аналитической части прибора обеспечивает долговечность и снижает трудоемкость при обслуживании. В газоанализаторе «Спектр-4» элементы отбора и подготовки пробы, которые требуют при обслуживании механической чистки, выполнены из коррозионностойких материалов — фторопласта-4, полиамида, оргстекла, сплава 12X18H10T. На поверхности остальных узлов, контактирующих с агрессивной пробой, нанесено многослойное покрытие из фторопластового лака по особой технологии. Все соединения газового тракта выполнены фторопластовой трубкой.

Программное обеспечение (ПО) комплекса ЭК-1 разработано в системе Borland C++ с использованием OWL и Windows API и ориентировано на работу под управлением Windows 98. Управляющая программа ПО реализована в виде пользовательского типа (класса) TGA Syst.

ЭВМ осуществляет дистанционное управление одновременно четырьмя газоанализаторами, производит обработку данных измерения, вывод показаний на монитор в цифровом выражении

и в форме графика одновременно для всех подключенных газоанализаторов. Программа выполняет архивирование результатов измерений в обоих формах представления, формируя суточные файлы данных раздельно для каждого газоанализатора, создает месячные папки данных, выполняет их усреднение по месяцам. Программа позволяет осуществлять ретроспективный просмотр всех файлов на экране, копирование на дискеты, распечатку на принтере параллельно с процессом измерения. Кроме этого, выполняется архивирование всех сообщений об отказах, отклонений контролируемых параметров от нормы, значений информативных сигналов при каждой установке "нуля" с регистрацией времени события. Это дает возможность проанализировать полученные результаты и сделать выводы об их достоверности. При подключении модема результаты измерений в соответствии с согласованным протоколом данных могут передаваться в базу данных экологической службы.

**А**налитический спектральный комплекс 306АС-01 предназначен для инспекционного контроля мощности выбросов промышленных предприятий, а также для оптимизации процессов горения. Выполнен в виде двух чемоданчиков типа "кейс" с дополнительными принадлежностями — набор пробоотборных зондов разной длины, совмещенных с датчиком температуры (термопара NiCr—NiAl), гибкий обогреваемый газопровод с обогреваемым фильтром, набор пневмометрических трубок для измерения скорости потока.

Комплекс 306АС-01 выполняет следующие функции:

- непрерывное измерение содержания CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>;
- измерение давления и температуры в точке отбора пробы;
- измерение скорости газопылевых потоков;
- вычисление объемного расхода потока;
- вычисление мощности газовых выбросов.

Его метрологические характеристики аналогичны характеристикам комплекса ЭК-1.

Измерение всех параметров газовых выбросов производится в полуавтоматическом режиме с помощью портативного компьютера типа "Note book".

Управляющая программа организована таким образом, чтобы оператор последовательно выполнял необходимые действия, следуя указаниям на экране компьютера. Компьютер, используя результаты измерений, оперативно вычисляет необходимые параметры данного объекта и формирует файл в виде квитанции, где фигурируют все данные, регламентированные экологической службой.

Комплекс в составе передвижной лаборатории инспекционного контроля, разработанной в АО «Укр-аналит» на базе автомобиля «Газель», успешно прошел длительные эксплуатационные испытания на промышленных объектах Донецкой области в жестких условиях эксплуатации.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Газоанализатор GN30-SP для определения концентраций NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO: Проспект/SICK.— 2000.— Германия.
2. Стационарная система анализа дымных газов IMR 8000: Проспект/IMR.— 1999.— Германия.
3. Система контроля содержания SO<sub>2</sub> и NO в выбросах промпредприятий SE 102: Проспект/МП "Смог".— 1998.— Ужгород.
4. Универсальный газовый монитор 1302: Проспект/Московск. центр ф. «Брюль и Кьер».— 2001.— Дания.
5. Автоматическая система контроля атмосферного воздуха и выбросов: Проспект/PPM Systems Oy.— 2000.— Финляндия.
6. Model DI2000, In-Situ Stack Multigas Analyser System: Проспект/Thermo Environmental Instruments Inc.— 1999.— США.
7. Continuous Emissions Monitoring Systems: EX 4700 A (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O), SM 8100 A (SO<sub>2</sub>, NO): Проспект/Lear Siegler Measurement Controls Corporation.— 1998.— США.
8. Хемиллюминесцентный анализатор NO/NO<sub>x</sub> Model RS-325 L: Проспект/Рикен Кейки.— 1997.— Япония.
9. Ваня Я. Анализаторы газов и жидкостей.— М.: Энергия. 1970.
10. Бреслер П. И. Оптические абсорбционные газоанализаторы и их применение.— Л.: Энергия, 1980.
11. Шишловский А. А. Прикладная физическая оптика.— М.: Физматгиз, 1961.
12. Перегуд Е. А., Горелик Д. О. Инструментальные методы контроля загрязнения атмосферы.— Л.: Химия, 1981.
13. А. с. 871125 СССР. Многоходовая оптическая кювета / Е. Г. Тохтуев, О. Н. Гейко, В. П. Пашинский.— 1981.
14. А. с. 807075 СССР. Многоходовая оптическая кювета / Е. Г. Тохтуев, О. Н. Гейко, В. П. Пашинский и др.— 1981.
15. Тохтуев Е. Г., Пашинский В. П. Выбор оптимальной длины кюветы для фотоабсорбционного газоанализатора / В кн.: Метрологическое обеспечение аналитических приборов и систем.— Киев: ВНИИАП, 1979.— С. 79—83.
16. Орлов М. А., Горлушко В. М. Метод оценки эффективности использования узкополосных интерференционных фильтров для оптических абсорбционных газоанализаторов / В кн.: Основные направления повышения технического уровня газоаналитических приборов.— Киев: ВНИИАП, 1988.— С. 104—111.
17. Дашковский А. А., Забава В. П., Федянин А. С. Зависимость оптической прозрачности газа от параметров анализируемой газовой смеси / Тез. докл. НТК "Состояние и перспективы развития систем и приборов анализа состава веществ".— Ужгород.— 1978.— С. 179.



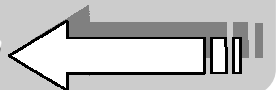
## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ПОДПИСЧИКОВ "ТКЭА" ВЫ МОЖЕТЕ ЗАКАЗАТЬ

по электронной почте <tkea@odessa.net> pdf-файлы любых статей, опубликованных в журнале за период с 1998 по 2003 год.

С содержанием номеров можно ознакомиться на сайте

<http://tkea.wallst.ru>

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ПОДПИСЧИКОВ "ТКЭА"



М. В. КОЛИСНИЧЕНКО, В. П. КУЦЕНКО, д. т. н. Ю. А. СКРИПНИК,  
д. т. н. А. Ф. ЯНЕНКО

Украина, г. Киев, ДП «Сонар», Нац. университет технологий и дизайна,  
НИЦ квантовой медицины «Видгук»; г. Донецк, Ассоциация «ТЕМП»  
E-mail: chmil@adamant.net

Дата поступления в редакцию  
21.04 — 17.07 2003 г.

Оппонент к. т. н. В. А. БИДЕНКО  
(НТУУ «КПИ», г. Киев)

## РАДИОМЕТРИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА: МЕДИЦИНСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

*Рассмотрены возможности использования СВЧ-радиометрии для регистрации и измерения электромагнитных полей и излучений биообъектов и человека.*

Высококочувствительные радиометрические системы (РС) и радиометры радиоволнового диапазона нашли широкое использование в радиоастрономии, физике, метеорологии и других областях науки и техники для измерения слабых электромагнитных излучений, интенсивность которых может быть меньше или сопоставима с интенсивностью собственных шумов этих систем. В меньшей мере РС используются в биологических и медицинских целях — в связи со значительной сложностью и стоимостью таких устройств.

Первые попытки применения в СССР высококочувствительных радиоволновых радиометров СВЧ-диапазона в медицинских исследованиях относятся к случаям измерения температуры внутренних органов человека по интенсивности электромагнитного излучения [1, 2]. Подобные измерения абсолютной температуры позволяют определять и регистрировать температурные аномалии и неоднородности, например, в онкологии (опухоли), эндокринологии (щитовидная и поджелудочная железы), энтерологии (желудочно-кишечный тракт), пульмонологии (бронхо-легочный тракт) [1—3]. С помощью дифференциальных радиометров можно проводить сравнительные измерения температуры парных органов человека — почек, грудей, легких [4].

Еще один из вариантов использования высококочувствительного СВЧ-радиометра в медицине приведен в [5]. Он базируется на измерении отклика в дециметровом диапазоне соответствующей зоны (органа) человеческого тела (например, щитовидной железы) на облучающий сигнал мм-диапазона. (Метод КВЧ—СВЧ-спектроскопии позволяет фиксировать отклонение спектральной характеристики исследуемого органа и в процессе лечения контролировать обновление функции органа по интенсивности и форме отклика, что регистрируется СВЧ-радиометром при облучении биообъекта низкоинтенсивным ( $<10 \text{ мкВт/см}^2$ ) сигналом мм-диапазона на частотах 50—53 ГГц.)

Разработка радиометрической аппаратуры для медицинских измерений связана с решением таких сложных вопросов как обеспечение высокой чув-

ствительности устройств, согласование входной антенны с биообъектом, обеспечение необходимой глубины проникновения и измерения абсолютных значений температур с погрешностью не хуже  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ .

Обычно процесс измерения температурных аномалий биообъектов проводится в контакте с источником излучения, а приемные антенны размещаются непосредственно на объекте исследования и согласовываются с его поверхностью. Использование РС в контакте с объектом измерения позволяет рассматривать этот случай как широко известный переход электромагнитного поля из одной среды в другую с разной диэлектрической проницаемостью, которая требует соответственного согласования.

Обеспечение согласования антенны с биообъектом достигается за счет выбора соответствующей конструкции и материала антенны. Антенны полоскового типа с диэлектрической проницаемостью, близкой к диэлектрической проницаемости кожи человека, позволяют выполнять контактные измерения температуры с достаточно высокой точностью и разрешающей способностью на частотах более 400—500 МГц [6]. На частоте 1 ГГц [5] используют антенны (аппликаторы) контактного типа — двухпетельные и трехпетельные на подкладках из СВЧ-диэлектриков (керамики, синтетических композитов, тефлона), в диапазоне СВЧ — антенны рупорного типа и микрополосковые.

Перспективным представляется использование в СВЧ-диапазоне диэлектрической линзовой антенны контактного типа, фокус которой соответствует исследуемому участку (или органу) в глубине тела человека [3]. На частоте  $f \approx 1,6 \text{ ГГц}$  ширина дифракционной точки составляла примерно 14 мм, а глубина проницаемости — 60 мм. В качестве диэлектрика авторами выбиралась вода, которая по диэлектрической проницаемости близка к проницаемости внутренних органов человека.

Глубина сканирования источников температурных неоднородностей определяется рабочей частотой радиометра и для внутренних органов человека находится в пределах диапазона ультравысоких (0,3—3 ГГц) и крайневых (3—30 ГГц) частот. Анализ физиологического состояния человека определяется в диапазоне сверхвысоких частот. По данным [2], проницаемость радиоволн в мягкие ткани биообъектов на частотах УВЧ- и СВЧ-диапазонов находится в пределах 38,9—16,1 мм. Большинство радиометров работа-

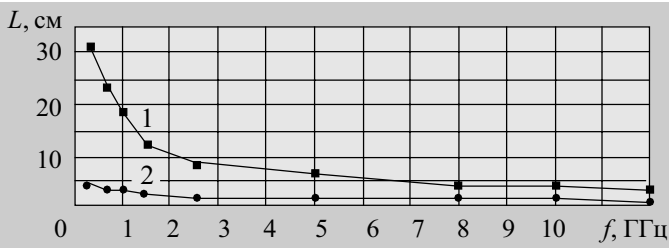


Рис. 1. График распределения глубины проникновения СВЧ-сигнала:

1 — ткани с низким содержанием воды; 2 — с высоким содержанием воды

ют в диапазоне 1—3 ГГц, где проникаемость в мягкие ткани ограничивается глубиной 30—16 мм (рис. 1).

Важной характеристикой радиометров подобного типа является флуктуационная чувствительность к температуре объекта или к интенсивности его излучения, поскольку при температуре 27°C (300 К) даже абсолютное черное тело формирует слабый сигнал, спектральная плотность которого составляет только  $1,07 \cdot 10^{-19}$  Вт/Гц·см<sup>2</sup>. В то же время уровень излучения кожи человека, учитывая коэффициент серости (коэффициент излучательной способности), значительно меньший —  $\sim 1 \cdot 10^{-21}$  Вт/Гц·см<sup>2</sup> [4, 7].

Проведение измерений электромагнитных полей и излучений на ультравысоких и сверхвысоких частотах требует создания устройств и систем, чувствительность которых должна достигать, например, при выполнении КВЧ—СВЧ-спектроскопии [5] на частоте 1 ГГц  $P_{\min} = 1 \cdot 10^{-13} \dots 1 \cdot 10^{-16}$  Вт/см<sup>2</sup>. Подобная чувствительность позволяет уверенно фиксировать электромагнитное излучение от биообъектов и создает возможность использовать измерительную радиометрическую аппаратуру для диагностики состояния исследуемого биообъекта (организма человека).

Известно, что радиометры выполняются по схеме прямого усиления и по схеме с преобразованием частоты СВЧ-сигнала (супергетеродинный приемник). По способу действия радиометры делятся на корреляционные, компенсационные и модуляционные.

Простейшими и наиболее распространенными являются компенсационные радиометры, которые содержат типовый тракт: усилитель — квадратичный детектор — фильтр — развязывающее устройство. Причем в последнем проводят компенсационное вычитание постоянной составляющей, обусловленной внутренними шумами. В то же время реально наиболее чувствительными являются модуляционные радиометры, которые позволяют реализовать высокую точность и разрешающую способность и возможность наблюдения слабого радиотеплового излучения объектов.

Нами была реализована схема модуляционного радиометра с преобразованием входного СВЧ-сигнала.

Электромагнитные излучения биообъектов принимаются антенной и подаются на модулятор входных сигналов. Схема радиометра обеспечивает высокую чувствительность за счет использования на входе маломощного СВЧ-усилителя, коэффициент шума которого на частотах 0,3—3,0 ГГц составляет приблизительно 0,5 дБ ( $\leq 40$  К). Выходной сигнал усилителя подается на балансный смеситель, после чего усиливается усилителем промежуточной частоты и поступает на квадратичный детектор.

Напряжение на выходе квадратичного детектора содержит составляющую, которая изменяется с частотой модуляции, и шумовую компоненту. Периодическая составляющая отфильтровывается и усиливается узкополосным усилителем, настроенным на частоту модуляции. С помощью синхронного детектора (СД) проводится демодуляция. К основным преимуществам СД относятся малые нелинейные искажения сигнала и отсутствие угнетения слабого сигнала сильной помехой благодаря работе детектора при достаточно большом напряжении опорного гетеродина частоты коммутации.

Опорное напряжение генератора частоты коммутации, которое подается на СД, соответствует выделенной частоте сигнала. Максимум полезного сигнала на выходе СД будет при  $\Omega_c = \Omega_r$  и совпадении фазовых соотношений. Поэтому в схему радиометра включен фазовращатель. Синхронное детектирование с помощью СД и усреднение фильтром нижних частот снижает флуктуационный порог и повышает разрешающую способность.

В результате перемножения сигнала на опорное напряжение генератора на выходе синхронного детектора формируется напряжение [4, с. 172]

$$\begin{aligned}
 u_{U2}(t) &= u_{A2}(t)u_2(t) = \\
 &= a \left[ \frac{U_0^2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\Omega t}{2n-1} + \Delta u_w^2(t) \right] \frac{4U_2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\Omega t}{2n-1} = \\
 &= \frac{2aKU_2U_0^2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} - \frac{2aKU_2U^2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)2\Omega t}{2n-1} + \\
 &+ \frac{4U_2}{\pi} Ka\Delta u_w^2(t) \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\Omega t}{2n-1}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Фильтром нижних частот выделяется постоянная составляющая сигнала (1) и медленно флуктуирующие напряжения низкочастотных шумов, которые приближены к частоте коммутации и проходят через полосовой фильтр усилителя, что ограничивает чувствительность радиометрического устройства.

$$u_{z1} = \frac{2aKU_2U_0^2}{\pi^2} + 2Ka \frac{U_2}{\pi} \Delta U_w^2(f) \sum_1^i (\Omega - \Omega_i). \quad (2)$$

Как видно из (1), в результате прохождения через полосовой фильтр усилителя шумов, приближенных к частоте коммутации, на выходе синхронного детектора формируется напряжение как низкочастотных (первый член уравнения), так и высокочастотных (второй и третий члены уравнения) составляющих. Высокочастотные составляющие уравнения (1) обычно задерживаются выходным фильтром измерителя. Напряжения первой составляющей (2), особенно от частот, приближенных к нулевой, свободно проходят на индикатор, создавая медленную флуктуацию показателя индикатора, что является одним из основных недостатков модуляционных радиометрических приемников как прямого усиления, так и с преобразованием входной частоты.

Уменьшить воздействие шумов, частота которых приближена к частоте модуляции, можно за счет вве-

дения отрицательных обратных связей (например, рассмотренным в [8] образом), соответствующим противофазным суммированием составляющих до процедуры синхронного детектирования, предложенным в [4, 9], а также сужением полосы пропускания фильтра коммутации. Использование положительной обратной связи в сочетании с методами снижения флуктуационного порога позволяет в 10—50 раз повысить чувствительность схем радиометров.

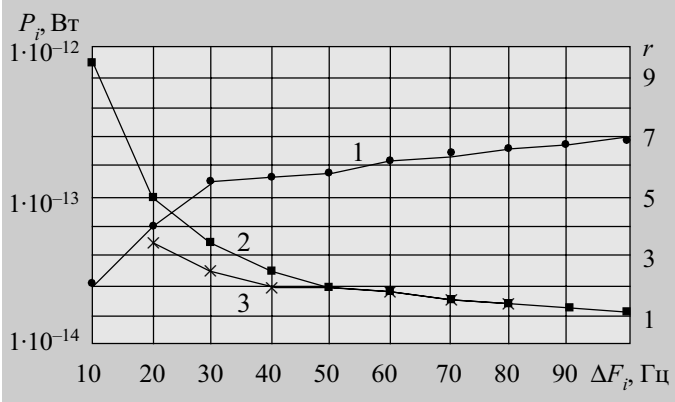


Рис. 2. Распределение интенсивности термодинамических флуктуаций в некоторых точках радиометрического канала:

зависимость интенсивности тепловых шумов  $P_f(I)$  и флуктуационного выигрыша  $r$  от полосы фильтра частоты коммутации  $\Delta F_p$  (2 — расчетный, 3 — экспериментальный)

На рис. 2 приведена зависимость распределения интенсивности тепловых шумов ( $I$ ) при различной полосе пропускания фильтра частоты коммутации, а также флуктуационный выигрыш (2 — расчетный, 3 — экспериментальный), который реально может составлять 4—5 раз.

\*\*\*

Широкий выбор элементной базы, наличие стандартных СВЧ-узлов позволяют создать высокочувствительные портативные малогабаритные радиометры, пригодные для использования в медицине. Несмотря на отмеченные недостатки модуляционных радиометрических приемников, они обеспечивают возможность измерения сигналов, интенсивность которых сопоставима или меньше интенсивности собственных шумов измерительной аппаратуры. Практически достигнутая чувствительность СВЧ-радиометров  $10^{-14}$ — $10^{-15}$  Вт достаточна для измерения и регистрации электромагнитных полей и излучений биологических объектов и человека, что открывает возможность широкого их использования в биологии и медицине.

Резюмируя возможности и перспективы использования СВЧ-радиометрии в медицине и научных исследованиях, необходимо отметить, что радиометрическая аппаратура СВЧ- и КВЧ-диапазонов позволяет:

- определять источники термонеоднородностей в организме биообъекта;
- проводить регистрацию значения этой температуры, измеряя как интегральную, так и спектральную характеристику излучения;
- проводить регистрацию воздействия физических и химических факторов на температурные поля внутренних органов биообъекта;
- регистрировать пространственно-частотные характеристики электромагнитных сигналов биообъектов и устанавливать связь между параметрами этих характеристик и физиологическими параметрами биообъекта;
- корректировать процесс лечения по изменению параметров электромагнитного поля биообъекта.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Троицкий В. С., Густов А. В., Белов И. Ф. и др. О возможности использования собственного теплового СВЧ радиоизлучения для измерения температуры его внутренних органов: результаты и перспективы // УФН.— 1981.— Т. 134, вып. 1.— С. 155—158.
2. Штейншлейгер В. Б., Мисежников Г. С., Сельский А. Г. Об одном радиофизическом методе обнаружения температурных аномалий внутренних органов человека // УФН.— 1981.— Т. 134, вып. 1.— С. 163 — 164.
3. Хитров Ю. А., Шестиперов В. А. СВЧ в медицине // Обзор по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ.— 1983.— С. 40—43.
4. Скрипник Ю. О., Манойлов В. П., Яненко О. П. Модуляційні радіометричні пристрої та системи НВЧ-діапазону.— Житомир: ЖІТІ, 2001.
5. Петросян В. Н., Синицин Н. И., Елкин В. А. и др. Роль резонансных молекулярно-волновых процессов в природе и их использование для контроля и коррекции состояния экологических систем // Биомедицинская радиоэлектроника.— 2001.— № 5—6.— С. 62—129.
6. Березовский В. А., Колотилов Н. Н. Биофизические характеристики тканей человека. Справочник.— К.: Наукова думка, 1990.
7. Ситько С. П., Скрипник Ю. А., Яненко А. Ф. Аппаратурное обеспечение современных технологий квантовой медицины.— К.: ФАДА, ЛТД, 1999.
8. Пат. 57820 Украины, G01R 29/26. Модуляційний радіометр / Ю. О. Скрипник, М. В. Колісниченко, О. П. Яненко.— Оpubл. в Бюл.— 2003, № 7.
9. Пат. 27625 Украины, G01R 29/26. Модуляційний радіометр / Ю. О. Скрипник, О. П. Яненко, С. М. Перегудов.— Оpubл. в Бюл.— 2000, № 4.

К. т. н. В. И. ШЕЛЕСТ, к. т. н. А. С. КОНДРАШОВ

Россия, г. С.-Петербург, Центр прикладной математики и механики СПбО РАН  
E-mail: ask\_mail@kengu.ru

Дата поступления в редакцию  
10.12 2002 г.

Оппонент д. т. н. Л. С. ЛУТЧЕНКОВ  
("ЭлектроРадиоАвтоматика", г. С.-Петербург)

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

*Разработан для автоматизированного расчета и анализа теплового режима электронного модуля любого структурного уровня и РЭС в целом.*

Современные радиоэлектронные средства (РЭС) любого назначения относятся к сложным системам, процесс создания которых характеризуется высокой размерностью задач, наличием большого числа возможных вариантов решения, необходимостью решения задач с учетом разнообразных (и часто противоположенных) влияющих факторов [1, 2]. При этом процесс теплофизического проектирования РЭС как сложных систем, в которых обеспечивается нормальный тепловой режим изделий электронной техники (ИЭТ), электронных модулей всех уровней структурной иерархии и радиоэлектронных комплексов, является одним из важнейших при создании РЭС.

В данной статье предлагается общесистемный концептуальный алгоритм процесса теплофизического проектирования, пригодный для автоматизированного расчета и анализа теплового режима ИЭТ, электронного модуля любого структурного уровня и РЭС в целом. На рисунке отражены основные проектные операции и процедуры, решающие задачи теплофизического проектирования.

В блоке 1 задается входная информация, которая содержится в техническом задании (ТЗ), и данные, полученные на этапе проработки компоновочной схемы и конструкции проектируемого РЭС:

- состав и типоразмеры базовой несущей конструкции (БНК), на основе которой создается РЭС;
- компоновка РЭС в БНК и проектный вариант размещения ИЭТ и электронных модулей в структурных модулях различного уровня иерархии БНК (блоках, секциях, стойках и др. в соответствии с [3]);
- размещение РЭС на объекте-носителе и состав комплекса РЭС;
- условия эксплуатации — тип среды (воздух, вода, почва) и ее температура, давление, влажность, наличие солнечной радиации, характеристики других внешних климатических воздействий;
- применяемая элементная база (типы ИЭТ и других электроэлементов);
- марки и параметры применяемых материалов, покрытий, ограничения на них;

— способы охлаждения (СО) и системы обеспечения тепловых режимов (СОТР), ограничения на них;

— необходимые варианты алгоритмического, математического, программного, технического, информационного и организационного обеспечения.

Следует подчеркнуть, что теплофизическое проектирование РЭС, в зависимости от постановки задачи, оговоренной в ТЗ, может осуществляться по нисходящему принципу с разных структурных уровней (например, комплект стоек — стойка — секция — блок) с использованием специализированных (частных) и централизованных баз данных. При этом решение поставленной задачи обеспечивается возможностью использования автоматизированного и интерактивного режимов работы.

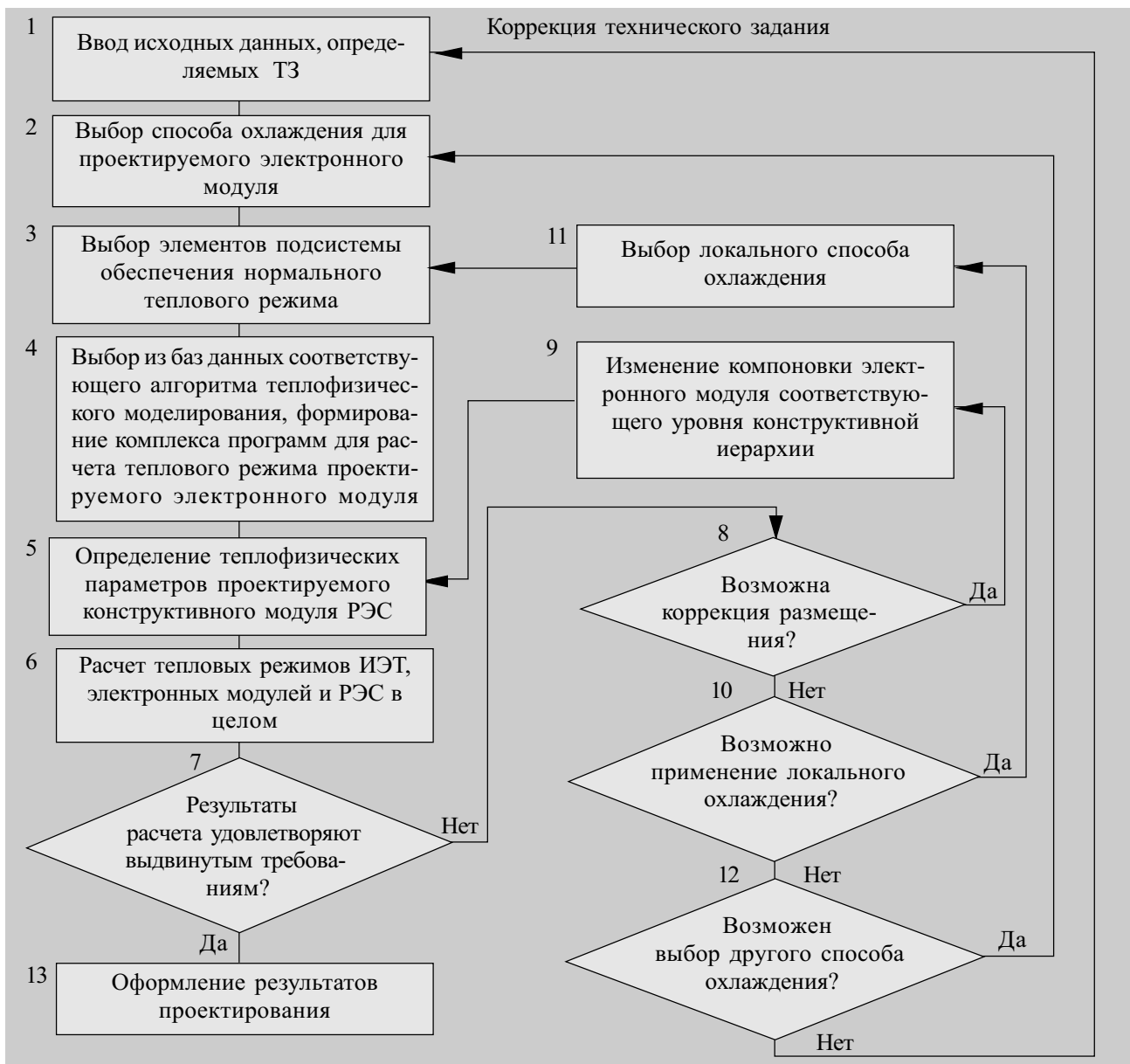
В блоке 2 реализуется выбор СО для проектируемого структурного модуля РЭС с учетом ограничений, сформулированных в ТЗ и обусловленных результатами синтеза конструкции и компоновочной схемы РЭС.

В блоке 3 производится выбор элементов СОТР, соответствующих выбранному СО.

Следует отметить, что разработка и возможность применения необходимых вариантов СО и СОТР закладывается на этапе системного синтеза БНК [4].

В блоке 4 происходит выбор алгоритма моделирования теплового режима проектируемого структурного модуля РЭС и формирование соответствующего комплекса машинных программ. Алгоритм определяет стратегию моделирования, т. е. устанавливает последовательность использования необходимых для решения задачи физико-математических моделей и методик.

В блоке 5, в соответствии с выбранным СО и результатами структурно-параметрического синтеза конструкции РЭС, определяются теплофизические параметры: тепловые сопротивления, тепловые проводимости и другие параметры, которые используются в блоке 6 для расчета тепловых режимов. В результате машинного расчета тепловых режимов определяются температурные поля (см. [5]) с различной степенью детализации и точностью (в зависимости от возможностей применяемых физико-математических моделей и методик, а также от стадий и этапов проектирования РЭС).



Общесистемный алгоритм теплофизического проектирования перспективных РЭС

В блоке 7 производится анализ и оценка вариантов расчета тепловых режимов. Здесь возможно применение многовариантных расчетов анализа чувствительности моделей в соответствии с работой [6]. Анализ должен способствовать определению нужного направления коррекции параметров или ТЗ с целью обеспечения нормальных тепловых режимов. При наличии местных (локальных) перегревов, как правило, проводится коррекция размещения ИЭТ, электронных модулей и комплекса РЭС в целом (блоки 8, 9), или применение локального охлаждения, а при необходимости — использование более эффективных СО и СОТР (блоки 2, 3, 10—13).

\*\*\*

Результаты процесса теплофизического проектирования РЭС как сложных систем используются при создании унифицированной системы перспективных БНК, электронных модулей и РЭС различного назначения в соответствии с программой Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации «Базовые несущие конструкции, печатные платы, сборка и монтаж электронных модулей» и с

программой Российского агентства по системам управления «Межотраслевая программа унификации, стандартизации и развития базовых несущих конструкций».

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Голубев А. В. Параметрический синтез многоуровневых конструкций радиоэлектронных средств.— СПб.: ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 1998.
2. Максимов А. В. Автоматизация процессов проектирования обслуживаемых ретрансляторов линий связи систем управления.— СПб.: ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 1999.
3. ГОСТ 26632—85. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств по функционально-конструктивной сложности. Термины и определения.
4. Лутченков Л. С. Автоматизированное проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств.— М.: Радио и связь, 1991.
5. Лутченков Л. С., Лайне В. А. Моделирование и анализ тепловых режимов аппаратуры многоканальной связи.— СПб.: ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 1995.
6. Норенков И. П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем.— М.: Высш. школа, 1986.

Л. М. ХОЛЬВИНСКАЯ, Т. Ю. НИКОЛАЕНКО,  
к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО

Дата поступления в редакцию  
20.03 2002 г.

Оппонент к. т. н. В. И. ЕФРЕМОВ  
(НИИ "Шторм", г. Одесса)

Украина, г. Киев, Естественно-научный лицей № 145

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОВОЛОЧНОГО РАДИАТОРА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

*Применение проволочного радиатора с субмиллиметровым диаметром проволоки вместо пластинчатого радиатора позволяет на 24—27% повысить коэффициент теплоотдачи.*

В радиоэлектронной аппаратуре для обеспечения нормальных тепловых режимов ее элементов широко используется теплоотвод, при этом перенос теплоты осуществляется преимущественно теплопроводностью и конвекцией.

Для повышения эффективности охлаждения мощных радиоэлементов их снабжают радиаторами с развитой поверхностью теплообмена — ребристыми, стержневыми, игольчатыми, пластинчатыми и др. С этой целью разработаны также петельно-проволочные радиаторы и радиаторы с использованием металлических сеток [1—4]. В известных конструкциях таких радиаторов диаметр проволоки составляет 0,5—1,2 мм, что обусловлено требованиями технологичности изготовления и необходимостью обеспечить достаточную жесткость конструкции.

Значение коэффициента теплоотдачи, рассчитываемого на основании закона Ньютона—Рихмана по формуле

$$\alpha = \frac{P}{S(t_c - t_b)}, \quad (1)$$

составляет для естественной конвекции воздуха 2—10 Вт/(м<sup>2</sup>·°С), для принудительной — 10—100 Вт/(м<sup>2</sup>·°С) [1, с. 42]. (Здесь  $P$  — тепловой поток, Вт;  $S$  — площадь нагретой поверхности, м<sup>2</sup>;  $t_c$  — температура нагретой стенки, °С;  $t_b$  — температура воздуха, °С.)

Вместе с тем в литературе есть данные о резком увеличении коэффициента теплоотдачи от нагретых тел, которые имеют субмиллиметровые размеры [5]. Учитывая эти данные, можно предположить, что дальнейшее уменьшение диаметра проволоки позволяет достичь еще большего повышения эффективности теплоотдачи проволочного радиатора. Однако с уменьшением диаметра проволоки, например, до 0,1—0,2 мм возникают значительные технологические трудности с изготовлением и механической стойкостью петельно-проволочных радиаторов известных конструкций.

Авторы выражают искреннюю благодарность С. К. Жуку и П. И. Самотовке.

Целью настоящей работы была разработка конструкции проволочного радиатора, простой в технологической реализации и механически стойкой в эксплуатации, при использовании в ней проволоки субмиллиметрового диаметра (0,1—0,2 мм), а также исследование процесса конвективного охлаждения мощного транзистора с использованием разработанного проволочного радиатора.

Для исследования интенсивности конвективного теплообмена между проволочным радиатором и окружающим воздухом была разработана и изготовлена экспериментальная установка, электрическая схема которой приведена на рис. 1. Она состоит из лабораторного трансформатора Т1 типа РНО-250-2А, силового трансформатора Т2, трех выпрямителей, элементов поддержания заданных значений тока и напряжения в цепи транзистора VT1, вентилятора FAN1 и измерительных приборов. Конструктивно силовой трансформатор Т2, предохранитель FU1, кнопка SB1, выпрямители (кроме конденсатора С3) и резисторы были смонтированы в виде отдельного блока.

Силовой трансформатор Т2 имеет две независимые вторичные обмотки, одна из которых подает напряжение на базу транзистора, а вторая предназначена для подачи напряжения 10 В на вентилятор.

Первый выпрямитель выполнен на мощных силовых диодах VD1—VD4 (типа Д242А с максимальным током 5 А) и фильтрующим конденсаторе С1 емкостью 1000 мкФ и максимально допустимым напряжением 100 В (в практическом исполнении конденсатор С1 представлял собой два последовательно соединенных конденсатора типа К50-3Б емкостью 2000 мкФ на максимально допустимое напряжение 50 В каждый). Нагрузкой этого выпрямителя являлись участок "коллектор—эмиттер" транзистора VT1 и резистор нагрузки R3. Резистор R3 имел сопротивление 2,1 Ом (практически состоял из двух последовательно соединенных резисторов ПЭВ-50 сопротивлением 1,05 Ом каждый).

Второй выпрямитель был выполнен на диодах VD5—VD8 типа Д226Г и конденсаторе фильтра С2 емкостью 5 мкФ на максимально допустимое напряжение 160 В. Его нагрузкой были участок "база—эмиттер" транзистора VT1 и резисторы R1 и R2, предназначенные для подачи и регулирования открывающего напряжения на базу транзистора. Ограничительный резистор R1 сопротивлением 200 Ом практически состоял из двух последовательно соединенных резисторов типа МЛТ-1 сопротивлением 100 Ом каждый. Переменный резистор R2 типа СП3-9а, 2200 Ом предназначен для регулирования тока через транзистор.

На диодном блоке типа КЦ405Э (VD9—VD12) и конденсаторе фильтра С3 типа К50-29 емкостью 1000 мкФ на 16 В был

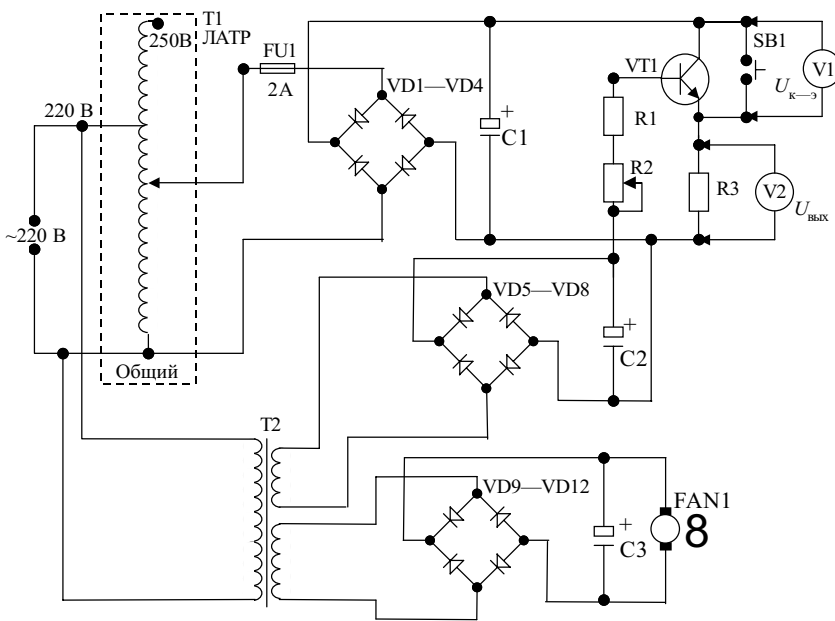


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

выполнен третий выпрямитель, предназначенный для питания электровентилятора FAN1 типа FC-28B, 12 В, 0,8 А.

Кнопка SB1 предназначена для разрядки конденсатора C1 через резистор R3 после отключения установки.

Вольтметр V1 — комбинированный прибор Ц437; вольтметр V2 — авометр типа DT-830B.

Основным элементом схемы является мощный транзистор VT1 типа 2Т808А, который вместе с радиатором сменной конструкции и вентилятором FAN1 представляет собой рабочий участок экспериментальной установки. Транзистор с радиатором и электровентилятор смонтированы на отдельной стеклотекстолитовой плате. На этой же плате был размещен конденсатор C3 и кнопочный переключатель типа КП1-4 (на электрической схеме не показан), предназначенный для подключения-отключения транзистора и вентилятора к электрической схеме. Конструкция рабочего участка показана на рис. 2.

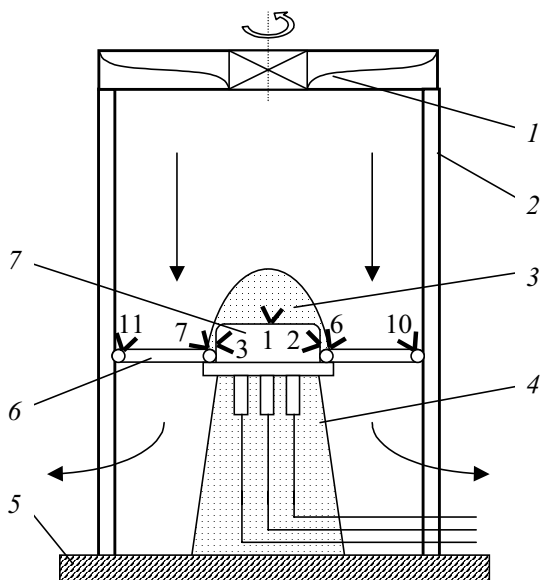


Рис. 2. Рабочий участок экспериментальной установки: 1 — электровентилятор; 2 — опора (4 шт.); 3 — колпачок с теплоизоляцией; 4 — теплоизоляционная подставка транзистора; 5 — стеклотекстолитовая плата; 6 — радиатор; 7 — транзистор

Для экспериментальных исследований были разработаны и изготовлены два варианта радиаторов (проволочный и пластинчатый типа “крыльчатка”), каждый из которых был плотно насажен на отдельный транзистор. Оба транзистора одного типа (2Т808А) были подсоединены к кнопочному переключателю (КП1-4), что давало возможность подключать к электрической части установок любой из двух транзисторов.

Разработанная конструкция радиатора с использованием медной проволоки субмиллиметрового диаметра показана на рис. 3 и состоит из двух concentric жестких проволочных (диаметр проволоки 1,5 мм) медных колец 1 и 2, соединенных между собой двумя перемычками 3. На образованный таким образом каркас намотана медная проволока 4 диаметром 0,12 мм.

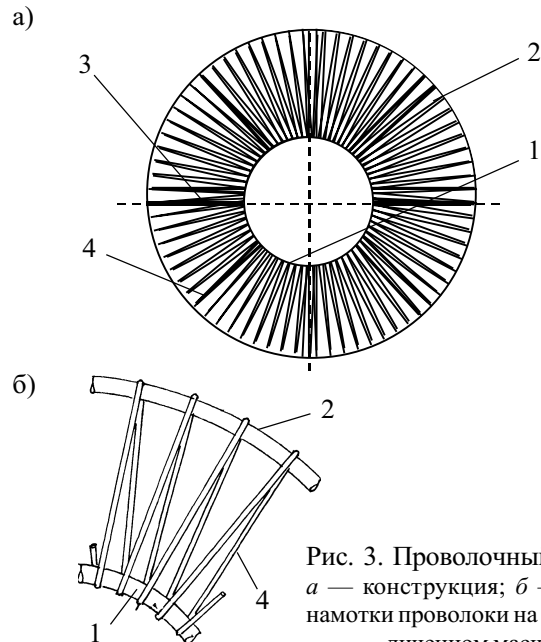


Рис. 3. Проволочный радиатор: а — конструкция; б — фрагмент намотки проволоки на каркас в увеличенном масштабе

Внутренний диаметр кольца 1 с намотанной проволокой несколько (на 0,05—0,1 мм) больше диаметра корпуса транзистора (21,5 мм), а внешний диаметр кольца 2 составлял 52 мм. Общая длина намотанной проволоки составляет 10,1 м или 361 виток. Общая поверхность проволоки и каркаса составляет 40 см<sup>2</sup>. Кольца 1 и 2 после намотки проволоки облуживались припоем ПОС 61, что позволило закрепить витки проволоки на кольцах и обеспечить надежный тепловой контакт между ними.

Пластинчатый радиатор типа “крыльчатка” с площадью поверхности, равной площади поверхности проволочного радиатора, изготовлен из листовой меди толщиной 0,5 мм. В зоне контакта с транзистором кромка радиатора отогнута. Крылья радиатора повернуты на угол 15—20 градусов.

Общий вид изготовленных проволочного радиатора и радиатора типа “крыльчатка”, насаженных на транзисторы, показан на рис. 4.

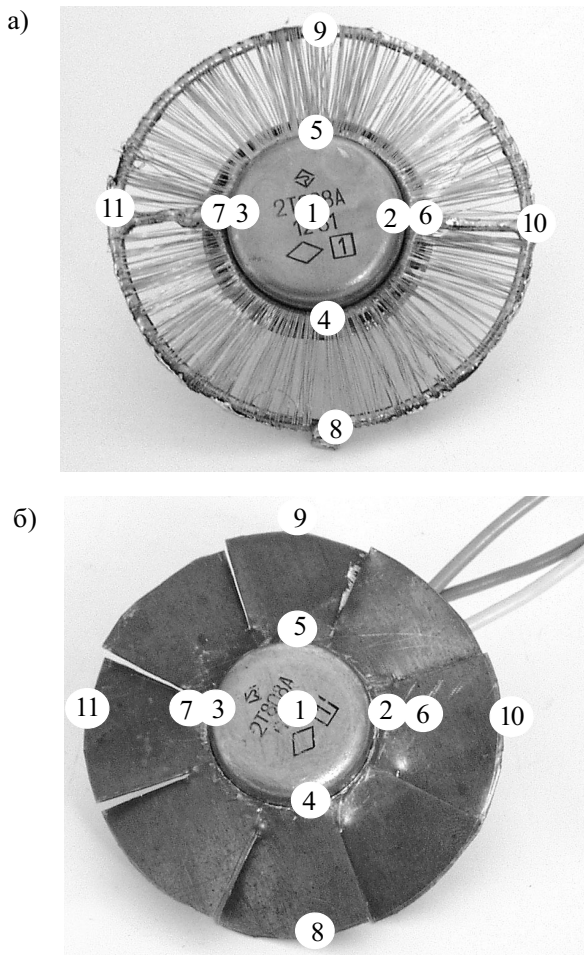


Рис. 4. Общий вид транзисторов с проволочным радиатором (а) и с пластинчатым радиатором типа “крыльчатка” (б)

Во время экспериментальных исследований проводились задание и контроль рассеиваемой транзистором мощности и измерение температуры в 11 характерных точках радиатора и транзистора. Контрольные точки, в которых измерялась температура, указаны на рис. 4 в виде белых кружочков с номером соответствующей контрольной точки. Частично контрольные точки (7 из 11) указаны также на рис. 2 “птичками” с рядом стоящим номером контрольной точки. Контрольные точки 4, 5, 8, 9 на рис. 2 не показаны. Точки 2 и 3 на рис. 2 лучше, чем на рис. 4, показывают места, в которых измерялась температура на боковой поверхности корпуса транзистора.

Измерение температуры проводилось контактным способом с помощью термопары-щупа в четырех режимах работы транзистора при рассеянии транзистором мощности 5 Вт:

- с использованием проволочного радиатора при естественной конвекции (с выключенным вентилятором) и при принудительной конвекции (с включенным вентилятором);

- с использованием пластинчатого радиатора типа “крыльчатка” при естественной конвекции (с выключенным вентилятором) и при принудительной конвекции (с включенным вентилятором).

С целью уменьшения тепловых потерь транзистор сверху был закрыт деревянным колпачком с теплоизо-

ляцией внутри из базальтового войлока, а снизу был установлен на теплоизоляционную подставку, также заполненную базальтовым войлоком (см. рис. 2). Это давало основание считать, что вся теплота, которая выделяется транзистором, рассеивается радиатором.

Количество теплоты, которая рассеивается транзистором, определяется как

$$P = P_{\text{бэ}} + P_{\text{кэ}}, \quad (2)$$

где  $P$  — общая рассеиваемая мощность транзистора;

$P_{\text{бэ}}$  — мощность, которая выделяется на участке “база—эмиттер” транзистора;

$P_{\text{кэ}}$  — мощность, которая выделяется на участке “коллектор—эмиттер”.

Учитывая, что  $P_{\text{бэ}} \ll P_{\text{кэ}}$ , величиной  $P_{\text{бэ}}$  можно пренебречь и считать, что  $P = P_{\text{кэ}}$ .

Задание и контроль рассеиваемой транзистором мощности осуществлялось следующим образом. С помощью лабораторного трансформатора Т1 на переходе транзистора 2Т808А “коллектор—эмиттер” устанавливалось напряжение 5 В, а с помощью переменного резистора R2 — напряжение на резисторе R3, равное 2,1 В. В этом случае через этот резистор протекал ток в 1 А, а поскольку участок “коллектор—эмиттер” транзистора включен последовательно с R3, то и через него будет идти ток в 1 А. Таким образом, значения рассеиваемой транзистором мощности в ваттах численно равнялись показаниям вольтметра V1 в вольтах. Значение напряжения на переходе “коллектор—эмиттер” транзистора контролировали комбинированным прибором Ц 437 (V1), а напряжения на резисторе R3 — с помощью авометра типа DT-830B (V2).

После установления стационарного режима проводилось измерение температуры в характерных точках на радиаторе и на транзисторе. Направление движения потоков воздуха через рабочий участок при работе вентилятора показано стрелками на рис. 2.

При напряжении питания 10 В вентилятор создавал максимальный объемный расход охлаждающего воздуха — 90 л/мин. Если бы весь этот поток воздуха от вентилятора мог попадать на радиатор, то при поперечном входном сечении радиатора 21 см<sup>2</sup> максимальная скорость воздушного потока на входе в радиатор составила бы 0,71 м/с. Однако часть воздушного потока уходит в стороны, поскольку вентилятор расположен над радиатором на расстоянии 9 см. Экспериментально было установлено, что расход охлаждающего воздуха, поступающего на радиатор, составил 37 л/мин, что эквивалентно средней скорости входящего воздушного потока 0,29 м/с.

Для измерения температуры использовалась одна хромель-копелевая термопара, расположенная на деревянном держателе и подключенная к цифровому термометру ЦР 7701-02. Термопара контактировала с нагретой поверхностью лишь непосредственно в момент измерения температуры, что позволило уменьшить теплоотток по проводам термопары от нагретых поверхностей.

Результаты измерений температуры приведены в табл. 1, а результаты их предварительной обработки — в табл. 2. По полученным значениям температуры и измеренным значениям тепловой мощности транзистора по формуле (1) были вычислены значения средних коэффициентов теплоотдачи при конвективном теплообмене при естественной и принудительной конвекции (см. табл. 3).

Таблица 1

Значения температуры (°C) в контрольных точках радиаторов

| Вид конвекции                                        | Контрольные точки на корпусе транзистора |      |      | Контрольные точки на радиаторе в зоне контакта с транзистором |      |      |      | Контрольные точки на периферийной поверхности радиатора |      |      |      |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------|------|------|---------------------------------------------------------------|------|------|------|---------------------------------------------------------|------|------|------|
|                                                      | 1                                        | 2    | 3    | 4                                                             | 5    | 6    | 7    | 8                                                       | 9    | 10   | 11   |
| Проволочный радиатор, $t_b=19,3^\circ\text{C}$       |                                          |      |      |                                                               |      |      |      |                                                         |      |      |      |
| Естественная                                         | 85,0                                     | 57,5 | 50,0 | 35,0                                                          | 55,8 | 51,5 | 50,0 | 29,4                                                    | 41,7 | 37,8 | 40,3 |
| Принудительная                                       | 27,4                                     | 23,5 | 21,2 | 22,3                                                          | 29,0 | 23,3 | —    | 19,2                                                    | —    | 20,5 | 21,7 |
| Радиатор типа “крыльчатка”, $t_b=19,1^\circ\text{C}$ |                                          |      |      |                                                               |      |      |      |                                                         |      |      |      |
| Естественная                                         | 55,5                                     | 65,9 | 70,7 | 56,0                                                          | 44,5 | 62,2 | 59,1 | 41,5                                                    | 41,5 | 43,5 | 42,2 |
| Принудительная                                       | 31,2                                     | 25,4 | 27,7 | 24,5                                                          | 23,3 | 24,3 | 26,4 | 21,3                                                    | 21,1 | 22,0 | 23,1 |

Таблица 2

Средние значения температуры (°C) в характерных точках радиаторов

| Вид конвекции                                        | Корпус транзистора | Радиатор в зоне контакта с транзистором | Периферийная поверхность радиатора | Радиатор в целом |
|------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|------------------|
| Проволочный радиатор, $t_b=19,3^\circ\text{C}$       |                    |                                         |                                    |                  |
| Естественная                                         | 64,2               | 48,1                                    | 37,3                               | 42,7             |
| Принудительная                                       | 24,0               | 24,9                                    | 20,4                               | 22,7             |
| Радиатор типа “крыльчатка”, $t_b=19,1^\circ\text{C}$ |                    |                                         |                                    |                  |
| Естественная                                         | 68,3               | 55,5                                    | 42,2                               | 48,9             |
| Принудительная                                       | 26,6               | 24,6                                    | 21,9                               | 23,3             |

Таблица 3

Средние коэффициенты теплоотдачи от проволочного радиатора и радиатора типа “крыльчатка”,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

| Вид конвекции  | Проволочный радиатор | Радиатор типа “крыльчатка” | % увеличения |
|----------------|----------------------|----------------------------|--------------|
| Естественная   | 53,4                 | 42,0                       | 29           |
| Принудительная | 368,0                | 298,0                      | 24           |

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при горизонтальной ориентации проволочного радиатора с диаметром медной проволоки 0,12 мм и площадью теплоотдающей поверхности 40 см<sup>2</sup> и размещении вентилятора сверху радиатора на расстоянии 9 см от его поверхности коэффициент теплоотдачи составил:

— при естественной конвекции 53,4 Вт/(м<sup>2</sup>·°C), при этом превышение средней температуры радиатора над температурой окружающего воздуха составило 23,4°C;

— при принудительной конвекции 368,0 Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Для пластинчатого радиатора типа “крыльчатка” с такой же площадью поверхности коэффициент теплоотдачи составил:

— при естественной конвекции 42,0 Вт/(м<sup>2</sup>·°C);

— при принудительной — 298,0 Вт/(м<sup>2</sup>·°C),

что, соответственно, на 27 и 24 % ниже, чем у проволочного радиатора.

Полученные значения коэффициента теплоотдачи сравнивались также с известными данными по теплоотдаче от петельно-проволочного оребрения с диаметром медной проволоки 0,68 мм и 0,5 мм. Так, из данных, приведенных в [2], следует, что при использовании медной проволоки диаметром 0,68 мм средний коэффициент теплоотдачи от пластинчатого петельно-проволочного радиатора размерами 70×100 мм

с высотой проволочных петель 15,4 мм, продольным шагом петель 2,5 мм, поперечным шагом петель 7,3 мм, при температурном перепаде 25°C, тепловом сопротивлении радиатора 2,25°C/Вт и общей площади теплоотдающей поверхности 489,5 см<sup>2</sup> при естественной конвекции составляет 9,08 Вт/(м<sup>2</sup>·°C), что в 5,9 раза меньше, чем у исследованного нами проволочного радиатора.

При принудительной конвекции средний коэффициент теплоотдачи для петельно-проволочного оребрения, выполненного из медной проволоки диаметром 0,5 мм с высотой петель 12 мм, шагом витков 7,5 мм, в условиях поперечного обдува воздушным потоком со скоростью от 2 до 12 м/с составляет от 81,9 до 116 Вт/(м<sup>2</sup>·°C) [6], что, соответственно, в 4,5 и 3,2 раза меньше, чем для предложенного нами проволочного радиатора с диаметром проволоки 0,12 мм.

Следует при этом указать на неидентичность скорости охлаждающего воздуха в сопоставляемых экспериментах. Так, коэффициент теплоотдачи для предложенного проволочного радиатора в эксперименте определялся при скорости воздуха 0,29 м/с, а значения коэффициента теплоотдачи проволочного радиатора-аналога взяты для значений 2 и 12 м/с (двух крайних значений, определенных по линии 3 на рис. 2, а статьи [6]). То есть неидентичность условий охлаждения в части скорости воздуха дополнительно свидетельствует об эффективности предложенного проволочного радиатора.

С физической точки зрения, увеличение коэффициента теплоотдачи от медной проволоки субмиллиметрового диаметра может быть обусловлено изменением характеристик пограничного слоя воздуха возле нагретой цилиндрической поверхности миниатюрных размеров, улучшением условий для возникновения турбулентности потоков окружающего воздуха и, как следствие, повышением интенсивности теплоотдачи.

**Выводы**

Предложена простая в технологической реализации конструкция проволочного радиатора с использованием в ней медной проволоки субмиллиметрового диаметра.

Исследование интенсивности теплоотдачи от поверхности такого радиатора при естественной и принудительной конвекции воздуха в условиях охлаждения мощного транзистора 2Т808А подтвердило эффективность конструкции. Коэффициенты теплоотдачи у такого радиатора значительно больше, чем у пластинчатого радиатора типа “крыльчатка”, а также по сравнению с известными конструкциями петельно-проволочного оребрения, выполненного медной проволокой диаметром 0,68 мм и 0,5 мм.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Чернышев А. А., Иванов В. И., Аксенов А. И., Глушкова Д. Н. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники. — М.: Энергия, 1980.

2. Орнатский А. П., Латенко Б. В., Попель Ю. С. Исследование влияния геометрических характеристик пластинчатых петельно-проволочных радиаторов полупроводниковых приборов на теплообмен при естественной конвекции // Теплофизика и теплотехника. — 1973. — Вып. 23. — С. 53—57.

3. Письменный Е. Н., Рогачев В. А., Босая Н. В. Исследование характеристик эффективности новой теплоотводящей поверхности с сетчатым оребрением при естественной конвекции // Промышленная теплотехника. — 1998. — Т. 20, № 3. — С. 30—33.

4. А. с. 1485329 СССР. МКИ Н01L23/36, Н05K7/20. Радиатор для охлаждения полупроводниковых приборов / В. М. Легкий, В. А. Рогачев. — Оpubл. в Б.И. — 1989, № 21.

5. Бочкарев Э. Г., Андреев В. М., Тузовский К. А. и др. Эффект гигантской теплоотдачи телами субмиллиметровых размеров // Доклады Академии наук. — 1999. — Т. 366, № 2. — С. 178—180.

6. Кремнев О. А., Зозуля Н. В., Хавин А. А. Теплоотдача продольнообтекаемых труб с петельно-проволочным оребрением // Энергомашиностроение. — 1962. — № 5. — С. 29—31.

*Б. П. БАЗЕЛЕВ, В. В. БЫКАДОРОВ, к. т. н. В. И. ЕФРЕМОВ,  
Л. Ф. ХРАМОВА*

Украина, г. Одесса, НИИ «Шторм»

Дата поступления в редакцию  
24.12 2002 г. — 22.04 2003 г.

Оппонент *к. т. н. М. Г. ХМЕЛЬНИЮК*  
(ОГАХ, г. Одесса)

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРИБЛИЖЕННОГО ПРЯМОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

*Предлагаемый метод позволяет проводить стендовые испытания теплообменников с теплоносителями, отличающимися от применяемых при их эксплуатации.*

Широкое применение технологии вакуумной пайки в процессах изготовления компактных теплообменных аппаратов привело к появлению многообразных конструкций теплообменников для различных видов техники — систем обеспечения тепловых режимов радиоэлектронной и другой аппаратуры, топливных и масляных систем авиационных двигателей, медицинской техники и др. Это обусловило применение различных типов жидких теплоносителей (вода, водоспиртовые смеси, антифризы, оптически прозрачные жидкости лазерной техники, горюче-смазочные материалы авиационных двигателей и т. п.).

Как правило, разработка компактных теплообменников и их изготовление осуществляются специализированными предприятиями, которые охватывают широкий спектр типов и размеров теплообменников, применяемых в разнообразных видах техники. Поэтому при проведении экспериментальных исследований в процессе разработки и изготовления теплообменников возникает необходимость переадресации испытательного оборудования тем теплоносителем, который применяется при эксплуатации конкретного теплообменника. Естественно, что такой подход не

может быть эффективным. В связи с этим очевидна актуальность разработки метода проведения испытаний на теплоносителе, имеющемся в стендовом оборудовании.

Возможность такой замены и требования к проведению испытаний установлены теорией моделирования [1—3], в соответствии с которой достоверные результаты могут быть получены при соблюдении необходимых и достаточных условий теплового подобия:

- геометрическое подобие;
- подобие условий движения теплоносителей при входе в теплообменник;
- подобие физических свойств теплоносителей;
- подобие температурных полей на границах, разделяющих теплоносители;
- одинаковость значений определяющих чисел подобия:

$$Re = idem; Pr = idem; \tag{1}$$

$$Re = \frac{wl}{v}; Pr = \frac{\nu}{a}; a = \frac{\lambda}{\rho c_p},$$

где Re — число Рейнольдса;  
Pr — число Прандтля;  
w — характерное значение скорости движения теплоносителя в теплообменнике;  
l — характерный (определяющий) размер;  
v, λ, ρ, c<sub>p</sub> — кинематический коэффициент вязкости, коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость теплоносителя, соответственно.

Рассмотрим возможность практического соблюдения вышеперечисленных условий моделирования при испытаниях теплообменника в рамках поставленной задачи. Такой метод моделирования, по определению, называется прямым моделированием.

Первые два условия выполняются однозначно, т. к. конструкция и все размеры модели и эксплуатируемого теплообменника (образца) одинаковы. Остальные условия осуществить очень трудно [1, 2].

Подобие физических свойств теплоносителя ( $\nu$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c_p$ ) требует, чтобы во всех сходственных точках образца и модели отношение соответствующих физических свойств было постоянно, что практически невозможно выполнить ввиду неизотермического движения теплоносителей в теплообменнике.

Условия подобия (1) реализовать в полном объеме удается в редких случаях. Например, если при эксплуатации теплообменника применяется техническое масло марки МК с температурой 50—60°C и значением  $Pr=2140—1320$  [4], то при исследовании модели с трансформаторным маслом для выполнения условия  $Pr = idem$  масло необходимо охлаждать до температуры ниже -5°C. Такое условие требует наличия в испытательном стенде холодильного оборудования, что не всегда возможно.

Выше рассматривался воздушно-жидкостный теплообменник, при исследовании модели которого необходимые параметры воздуха можно обеспечивать, как правило, испытательным оборудованием. При исследовании же жидкостно-жидкостных теплообменников нередко возникает необходимость замены в модели двух типов теплоносителей (горячего и холодного), что практически исключает возможность выполнения всех условий теплового подобия и, как следствие, не позволяет применять теорию моделирования в ее строгом виде.

В данной работе предлагается метод приближенного прямого моделирования, позволяющий определять теплогидравлические характеристики образца по результатам испытаний модели при помощи коэффициентов пересчета.

Суть метода приближенного прямого моделирования сводится к следующему.

Проводится экспериментальное определение теплового потока в модели ( $Q_M$ ) в диапазоне расходов теплоносителей, установленном техническими требованиями к испытаниям образца. При этом температурные режимы теплоносителей в модели и образце могут отличаться.

Известно, что тепловой поток  $Q$ , передаваемый в теплообменнике от горячего теплоносителя холодному, равен [1]

$$Q = k \cdot \Delta \bar{t} \cdot F, \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент теплопередачи;  
 $\Delta \bar{t}$  — средний температурный напор;  
 $F$  — площадь теплопередающей поверхности.

Очевидно, что для модели и образца  $F=idem$ , а значения  $k$  и  $\Delta \bar{t}$  могут быть не равны.

Значение  $\Delta \bar{t}$  рассчитывается с помощью аналитически полученных формул [1, 2].

Для расчета  $k$  необходимо знать коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  горячего и холодного теплоносителей

[1, с. 207; 2, с. 401]. Величину  $\alpha$  можно определить, зная число Нуссельта  $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ . С другой стороны, критерий подобия  $Nu$  описывается выражением

$$Nu = c Re^n Pr^m, \quad (3)$$

где значения  $c$ ,  $n$  и  $m$  определяются путем обобщения многочисленных экспериментальных данных, в том числе и по теплоотдаче различных типов теплоносителей и теплообменных поверхностей [1, 2, 5, 6].

Таким образом, для горячего и холодного теплоносителей можно подыскать уравнения подобия (3), полученные для теплообменных поверхностей, близких или таких же по форме, как и в образце. При этом необходимо учитывать, что значения чисел  $Re$  и  $Pr$  для теплоносителей образца и модели должны находиться в диапазонах, для которых справедливы эти уравнения.

Следует отметить, что можно создать экспериментальные стенды, провести исследования теплоотдачи и получить уравнения подобия для теплообменных поверхностей образца. Однако для рассматриваемых нами случаев это нецелесообразно.

Далее проводится расчет теплового потока модели ( $Q_p^M$ ) для тех же теплоносителей, что и в эксперименте, и с использованием выбранных уравнений подобия. Из числа выбранных уравнений подобия отбирается наиболее подходящее, которое обеспечивает наименьшее расхождение расчетных значений  $Q_p^M$  с экспериментальными  $Q_p^o$ .

Затем по отобранному уравнению рассчитываются значения теплового потока для теплоносителей, применяемых в образце ( $Q_p^o$ ).

Ожидаемый тепловой поток, передаваемый в теплообменнике-образце в условиях его эксплуатации ( $Q_o$ ), рассчитываем следующим образом:

$$Q_o = \frac{Q_p^o}{Q_p^M} Q_o^M. \quad (4)$$

В этой формуле отношение  $Q_p^o / Q_p^M$  и есть коэффициент пересчета ( $K_{om}$ ), учитывающий различие тепловых характеристик образца и модели.

На практике для удобства проведения испытаний часто пользуются величиной т. н. приведенного теплосъема  $Q_{пр}$ :

$$Q_{пр} = \frac{Q}{t'_r - t'_x}, \quad (5)$$

где  $t'_{r(x)}$  — температура горячего (холодного) теплоносителя на входе в теплообменник.

Очевидно, что предлагаемый метод применим и для расчета  $Q_{пр}$ .

Предложенный метод приближенного теплового моделирования аналогичным образом можно использовать и для определения гидравлического сопротивления горячей и холодной полостей теплообменника.

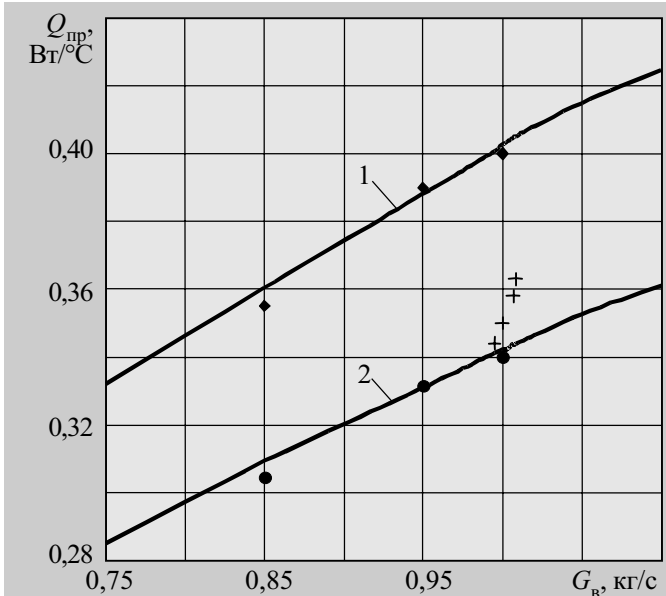
Приведем результаты приближенного теплового моделирования воздушно-масляного теплообменника (ВМТ), эксплуатируемого с авиационным маслом Б-3В.

Параметры, при которых необходимо проводить тепловые испытания:

- температура масла на входе в ВМТ 126°C;
- расход масла 40 кг/мин;

— температура воздуха на входе в ВМТ 40°C;  
 — расход воздуха 0,85 кг/с; 0,95 кг/с; 1,00 кг/с.

Испытания модели проводились с использованием антифриза 65. Испытательное оборудование обеспечивало максимальную температуру жидкого теплоносителя 90°C, поэтому испытания проводились при температуре антифриза 85±3°C.



Зависимость приведенного теплосъема от расхода воздуха:

1 — расчетные значения для антифриза 65; 2 — расчетные значения для масла Б-3В;

◆ — результаты испытаний модели; ● — ожидаемые результаты испытаний образца; + — результаты испытаний образца в составе объектов

В результате испытаний получены три значения приведенного теплосъема (см. рисунок).

Далее после предварительных расчетов из числа выбранных уравнений подобия отобраны наиболее подходящие [6, с. 26]:

$Nu=0,0897 \cdot Re^{0,526} \cdot Pr^{0,526}$  — для жидкого теплоносителя;

$Nu=0,0176 \cdot Re^{0,8}$  — для воздуха.

Расчетные значения приведенного теплосъема, а также полученные при испытаниях теплообменника в составе объекта, показаны на рисунке. Получено значение коэффициентов пересчета  $K_{ом}=0,853$ . Погрешность полученных результатов моделирования по сравнению с результатами испытаний не превышала 10%.

\*\*\*

Предложенный метод приближенного прямого моделирования теплогидравлических характеристик теплообменников неоднократно апробирован при испытаниях теплообменников систем обеспечения тепловых режимов аппаратуры и воздухо-масляных теплообменников, применяемых в составе двигателей летательных аппаратов АН-140 и АН-70 с различными типами масел — Б-3В, ЛЗ-240, ИПМ-10 и др. Все испытания при моделировании проводились с использованием антифриза 65. Результаты последующих испытаний теплообменников в составе объектов подтвердили правомочность предлагаемого метода.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи.— М.: Энергия, 1977.
2. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача.— М.: Энергия, 1969.
3. Кирпичёв М. В., Михеев М. А. Моделирование тепловых устройств. — М.- Л.: Изд-во АН СССР, 1936.
4. Теплотехнический справочник. Т. 1.— М.: Госэнергоиздат, 1957.
5. Кейс В. М., Лондон А. Л. Компактные теплообменники.— М.: Энергия, 1967.
6. Антуфьев В. М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева.— М.: Энергия, 1966.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Ярлык Н. Е. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ НАДЕЖНОСТИ.— М.: Радио и связь, 2003.— 192 с.**

Рассматриваются прикладные вопросы контроля надежности изделий, использующих современную радиоэлектронную базу, повышение достоверности и снижение стоимости контроля. Описаны инженерные методы расчета параметров последовательных испытаний, даны рекомендации по их применению.

Для специалистов, занимающихся обеспечением надежности изделий радиоэлектроники, может быть полезна студентам вузов.

**Кириллов В. И. МНОГОКАНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ.— М.: Новое знание, 2002.— 752 с.**

Рассматриваются основные принципы построения цифровых и аналоговых многоканальных систем передачи. Излагаются особенности реализации функциональных узлов аппаратуры передачи и специфика преобразований сигналов в них. Описываются процедуры проектирования и эксплуатации оборудования систем передачи.

Для студентов вузов специальностей «Телекоммуникационные системы», «Многоканальные системы передачи», «Оптические системы передачи и обработки информации» и др., а также инженерно-технических работников отрасли связи. Учебник для вузов.



К. ф.-м. н. А. Г. ГОЛОВКО

Украина, г. Кизомыс, НПФ «Артур»  
E-mail: argo\_m@ukr.net

Дата поступления в редакцию  
25.11 2002 г. — 02.04 2003 г.

Оппонент А. Г. СТЕПАНУШКИН  
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

## ОБЛАСТЬ ПОВЫШЕННЫХ ШУМОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ФОТОРЕЗИСТОРАХ

*Показано, что существует узкая область, в которой спонтанные флуктуации падения напряжения на фоторезисторе существенно возрастают.*

Качество преобразования фоторезисторами потока фотонов в электрический сигнал в значительной мере зависит от флуктуационных свойств применяемого полупроводникового материала.

В настоящей работе рассмотрены особенности проявления нестабильности смещения фоторезисторов в зависимости от длины волны облучающего света постоянной интенсивности. Они могут быть учтены при разработке высокочувствительной аппаратуры.

На **рис. 1** представлена полученная нами экспериментальная кривая зависимости средней величины отклонений величины смещения (напряжения)  $\langle \delta u(t) \rangle$  на фоторезисторе в зависимости от длины волны  $\lambda$  освещающего монохроматического света (кривая 1). Исследуемый образец изготовлен на основе аморфного CdSe. Он был подключен к источнику постоянного напряжения  $U=20$  В через нагрузочный резистор сопротивлением  $R=1,8$  МОм. Спонтанно возникающие в цепи изменения падения напряжения на образце измеряли в диапазоне частот 665—735 Гц. Видно, что существует область длин волн, в которой нестабильность существенно выше.

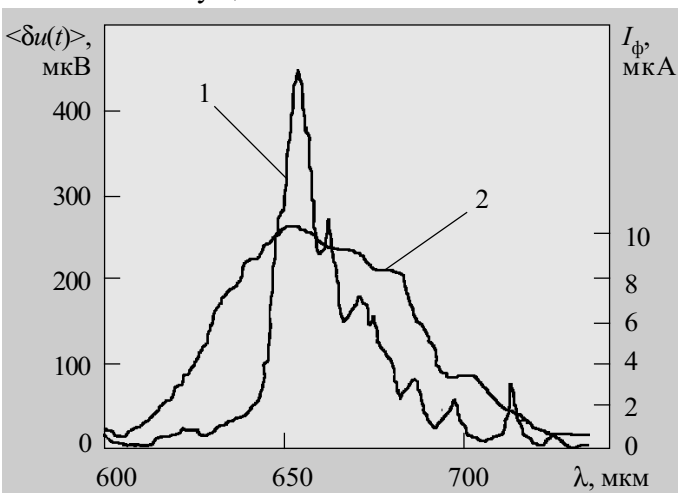


Рис. 1

Некоторые результаты аналогичных измерений для других полупроводниковых материалов приведены в [1], где наглядно показана индивидуальность указан-

ных характеристик в зависимости от структуры и состава полупроводникового материала. Причем для каждого вида полупроводников исследуемая характеристика типична и постоянна.

Рассмотрим на нашем примере, как соотносится область повышенной нестабильности с областью оптической чувствительности фоторезистора. Из рис. 1 видно, что кривая 2 фототока  $I_{\phi}$  охватывает более широкий диапазон длин волн, чем область повышенной нестабильности. Очевидно, что для обеспечения особой чувствительности аппаратуры разработчикам можно учесть это явление. (Аналогичные кривые несложно самостоятельно получить для используемых типов фоторезисторов.)

Дальнейший анализ показывает, что область фоточувствительности образца удобно определять областью резкого снижения его сопротивления (**рис. 2**, кривая 1). При этом величина постоянного смещения фоторезистора  $U(\lambda)$  для используемой схемы включения не имеет столь резких границ спада и роста (кривая 2). С учетом этого мы рассчитали относительную величину нестабильности смещения  $\langle \delta u(t) \rangle U(\lambda)$  (см. кривую 3), область которой оказалась уже, чем для кривой 1 рис. 1.

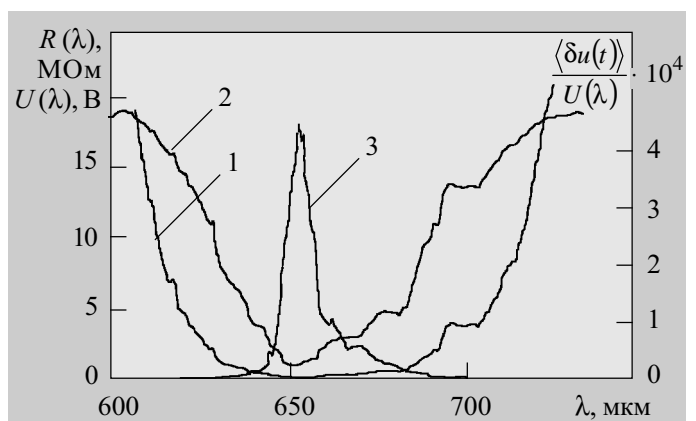


Рис. 2

Таким образом, установлено, что для фоторезистивных материалов существует полоса длин волн, которая наиболее ответственна за возникновение флуктуаций падения напряжения на образце и которая фактически определяет потребительские свойства фоторезисторов в части уровня шумов преобразования.

Природа этого явления может быть понята, если воспользоваться знаниями о генерационно-реком-

бинационных процессах в полупроводниках. Напомним, что, разделив измеренный нами параметр  $\langle \delta u(t) \rangle$  на корень квадратный из ширины частотной полосы исследуемого сигнала  $\Delta f$ , получим флуктуационный параметр — текущий спектр  $S_u(f)$  флуктуаций, связанный со спектральной плотностью  $G_u(f)$  соотношением [2]

$$S_u(f) = 0,78 G_u(f)^{1/2}.$$

В области низких частот этот параметр описывает т. н. 1/f-шумы. Их максимальный уровень при фотоэффекте обусловлен протеканием межзонных обменных процессов электронами. Эти процессы определяют флуктуации электропроводности материала [3—6].

Протекание через образец электрического тока приводит к флуктуациям падения напряжения на нем. Поэтому флуктуация электропроводности  $\delta g(t)$ , ее среднее значение  $\langle \delta g(t) \rangle$  и спектр  $S_g(f)$  преобразуются электрической цепью во флуктуацию напряжения  $\delta u(t)$ , измеренный нами параметр  $\langle \delta u(t) \rangle$  и спектр  $S_u(f)$ . Закон этого преобразования известен [7—9]:

$$\delta u(t) = \delta g(t) r_d U = \delta g(t) R U; \quad (1)$$

$$\langle \delta u(t) \rangle = \langle \delta g(t) \rangle r_d U = \langle \delta g(t) \rangle R U; \quad (2)$$

$$S_u(f) = S_g(f) r_d^2 U^2 = S_g(f) R^2 U^2, \quad (3)$$

где  $r_d$  — дифференциальное сопротивление образца (в случае омического образца — фоторезистора —  $r_d = R$ ).

Обратим внимание в (1)—(3) на то, что при освещении флуктуации электропроводности образца подавляются за счет снижения величины сопротивления  $R = R(\lambda)$ , причем для различных длин волн — по-

разному. Одновременно уровень флуктуаций напряжения растет с увеличением смещения и силы тока.

Таким образом, в распоряжении разработчиков аппаратуры имеется несколько факторов, учет которых может снизить уровень «зашумленности» преобразованного фоторезистором сигнала.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Golovko A. G., Golovko T. A. Non-stability electric charge transport in semiconductors / Proc. of the international school conference “Physical problems in material science of semiconductors”.— Chernivtsi, 11—16 Sept. 1995.— P. 267.
2. Мирский Г. Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов.— М.: Энергия, 1972.
3. Нарышкин А. К, Врачев А. С. Теория низкочастотных шумов.— М.: Энергия, 1972.
4. Бочков Г. Н., Кузовцев Н. Е. Новое в исследованиях 1/f-шума // УФН.— 1983.— Т. 41, вып. 1.— С. 151—176.
5. Hooge F. N., Kleinpenning T. G. M., Vandamme L. K. J. Experimental studies of 1/f noise // Rep. Prog. Phys.— 1981.— Vol. 44.— P. 479—532.
6. Ван дер Зил А. Флуктуационные явления в полупроводниках.— Г.: Изд-во ИЛ, 1961.
7. Головки А. Г., Головки Т. А. Актуальные проблемы 1/f-шумов / Тр. междунар. семинара «Шумы и деградационные процессы в полупроводниковых приборах».— Москва, 27—30 нояб. 1996.— С. 140—151.
8. Головки А. Г., Головки Т. А. Новый флуктуационный закон для стационарных процессов переноса зарядов / Тр. междунар. семинара «Шумы и деградационные процессы в полупроводниковых приборах».— Москва, 17—20 нояб. 1998.— С. 264—268.
9. Головки А. Г. Проблемы флуктуаций напряжения в высокоточных электрических цепях // Автоматика. Автоматизация. Электрические комплексы и системы. (Херсон)— 1998.— № 1.— С. 77—82.

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Влияние циклического режима работы охлаждающего термоэлектрического устройства на его надежность. В. П. Зайков, В. Ф. Моисеев (Украина, г. Одесса)
- КМОП ИС задающего генератора с кварцевой стабилизацией частоты. В. И. Золотаревский, Л. И. Самотовка, Ю. Д. Мазалецкий, Б. А. Балай, Е. С. Товмач, А. Ф. Воцинкин (Украина, г. Киев)
- Система глобального дистанционного зондирования Земли в ИК-диапазоне с геостационарных орбит. Б. Н. Формозов (Россия, г. С.-Петербург)



- Стабильность характеристик медных пленочных термопреобразователей сопротивления. В. В. Брайловский, О. Е. Иларионов, П. М. Шпатар (Украина, г. Черновцы)
- Многофункциональный сенсор с цифровой индикацией. И. М. Викулин, С. В. Ильин, В. А. Мингалев (Украина, г. Одесса)
- Выращивание гетероструктур GaSb/InAs жидкофазной эпитаксией без растворения подложки. И. Е. Марончук, В. В. Курак, Е. В. Андропова, Е. А. Баганов (Украина, г. Херсон)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

В номере 4 журнала за 2003 год на стр. 51 в статье «Преобразование низкочастотных флуктуаций электропроводности в датчиках с нелинейной ВАХ» в формулах (4)—(6) допущена опечатка — использован знак приближенного равенства ( $\approx$ ), тогда как должна быть тильда ( $\sim$ ) — как знак перехода к упрощенной формуле без коэффициентов преобразования для удобства восприятия природы протекающих процессов:

$$r_d(I) = (nkT/qI_0)[(I/I_0)+1]^{-1} \sim 1/[(I/I_0)+1], \quad (4)$$

$$U = (nkT/q) \ln[(I/I_0)+1] \sim \ln[(I/I_0)+1]. \quad (5)$$

$$S_u(f) \sim \ln[(I/I_0)+1]/[(I/I_0)+1] \sim rdU \quad (6)$$

К. т. н. В. П. ЗАЙКОВ, к. т. н. Л. А. КИНШОВА,  
В. В. БЫКАДОРОВ, Л. Ф. ХРАМОВА

Украина, г. Одесса, НИИ «Шторм»

Дата поступления в редакцию  
27.12 2002 г. — 02.06 2003 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Л. Н. ВИХОП  
(Ин-т термоэлектричества, г. Черновцы)

## КРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ РЕЖИМА РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

*Описаны возможности критериального подхода как метода поиска промежуточных (компромиссных) режимов работы при проектировании термоэлектрических охлаждающих устройств.*

При проектировании термоэлектрических охлаждающих устройств (ТЭУ) обычно задаются холодопроизводительностью ( $Q_0$ ), температурой теплопоглощающего спая ( $T_0$ ) и температурой тепловыделяющего спая ( $T$ ). В процессе проектирования ТЭУ накладываются различные ограничения — по холодопроизводительности, потребляемой мощности ( $W$ ), падению напряжения ( $U$ ), величине рабочего тока ( $I$ ) и т. д., и необходимо выбрать режим работы охлаждающего элемента с учетом перечисленных ограничений.

В литературе по термоэлектрическому охлаждению описаны характерные режимы работы охлаждающего устройства, а именно, режим максимальной холодопроизводительности  $Q_{0\max}$  и максимального холодильного коэффициента  $E_{\max}$  [1], режим тепловой изоляции (нулевой холодопроизводительности —  $Q_0=0$ ) [2]. Проектирование ТЭУ в характерном режиме  $Q_{0\max}$  хотя и обеспечивает минимальное количество термоэлементов, однако связано с большими энергозатратами, что приводит к возрастанию тепловых потоков на тепловыделяющих спаях ТЭУ, росту теплоотводящей поверхности радиатора, а следовательно, габаритов и массы устройства в целом. Проектирование же ТЭУ в характерном режиме  $E_{\max}$  позволяет свести энергозатраты к минимуму, но, в то же время, приводит к увеличению количества термоэлементов  $n$ , т. е. массы и стоимости ТЭУ.

Эта противопоставленность указывает на то, что существуют промежуточные, компромиссные режимы работы охлаждающего термоэлемента, отличные от характерных.

Следует отметить, что в режиме нулевой холодопроизводительности достигается только необходимый перепад температур —  $\Delta T$  при ( $Q_0=0$ ), что заметно сужает область его рационального использования.

К числу известных промежуточных режимов следует отнести:

- режим минимального тока при заданной холодопроизводительности [2, с. 152] либо максимальной холодопроизводительности при заданном токе [3, с. 87] —  $I_{\min}$ ;
- режим  $U_{\min}$  — максимального отношения холодопроизводительности к напряжению  $U$  [4];
- режим  $q_{\min}$ , обеспечивающий минимальную величину десорбции (остаточного газовыделения) ТЭУ [5].

В большинстве случаев при выборе режима работы ТЭУ необходимо учитывать взаимное влияние и весомость каждого из ограничительных факторов. В этом случае появляется необходимость использования критериального подхода при проектировании ТЭУ с учетом основных значимых факторов. Так как условия проектирования могут быть весьма разнообразными, то варьируя одновременно ряд ограничительных факторов ( $Q_0$ ,  $W$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $n$  и т. д.), можно выбрать компромиссный режим работы охлаждающего термоэлемента. Так, режим  $K_{\text{опт}}$  [6] лежит в области возможных режимов между  $Q_{0\max}$  и  $E_{\max}$  и обеспечивает, по сравнению с режимом  $E_{\max}$ , большую холодопроизводительность, меньшее количество термоэлементов при незначительном увеличении энергозатрат. Режим  $P_{\text{опт}}$  [7] лежит в области возможных режимов между  $q_{\min}$  и  $U_{\min}$  и обеспечивает одновременно повышение холодопроизводительности, уменьшение теплоотводящей способности радиатора и уменьшение количества термоэлементов по сравнению с режимом  $U_{\min}$ .

Целью настоящей работы является поиск промежуточных режимов работы охлаждающего термоэлемента, лежащих в интервале между известными.

Определим режим работы охлаждающего термоэлемента, обеспечивающий одновременно наибольшие значения холодопроизводительности, холодильного коэффициента и напряжения.

Указанные выше требования можно записать в виде критерия:

$$A = Q_0 E U = Q_0 \frac{Q_0}{W} U = Q_0 \frac{Q_0}{I} = \frac{Q_0^2}{I}. \quad (1)$$

Учитывая взаимозависимость требований, можно показать, анализируя (1), что искомый режим лежит в интервале между известными режимами — режимом максимальной холодопроизводительности  $Q_{0\max}$  и режимом максимального отношения  $Q_0/I$ .

Используем известные соотношения:

$$Q_0 = \frac{1}{2} I_{\max}^2 R (2B - B^2 - \Theta); \quad (2)$$

$$I = I_{\max} B; \quad (3)$$

$$U = I_{\max} R \left( B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right), \quad (4)$$

где  $I_{\max} = \frac{eT_0}{R}$  — максимальный рабочий ток, А;  
 $e$  — коэффициент термо-эдс ветви термоэлемента, В/К;  
 $T_0$  — температура теплопоглощающего спая, К;  
 $R$  — электрическое сопротивление ветви термоэлемента, Ом;  
 $B$  — относительный рабочий ток,  $B = I/I_{\max}$ ;  
 $I$  — рабочий ток, А;  
 $\Theta$  — относительный перепад температур.

Подставив (2) и (3) в (1), получим:

$$A = \frac{1}{4} I_{\max}^3 R^2 \frac{(2B - B^2 - \Theta)^2}{B}. \quad (5)$$

На рис. 1 приведена зависимость критериального соотношения  $4A/(I_{\max}^3 R^2)$  от относительного рабочего тока  $B$  при заданных значениях  $\Theta$ . Характерной особенностью кривых является наличие максимума (штриховая линия — геометрическое место точек, соответствующих максимальным значениям критериального соотношения).

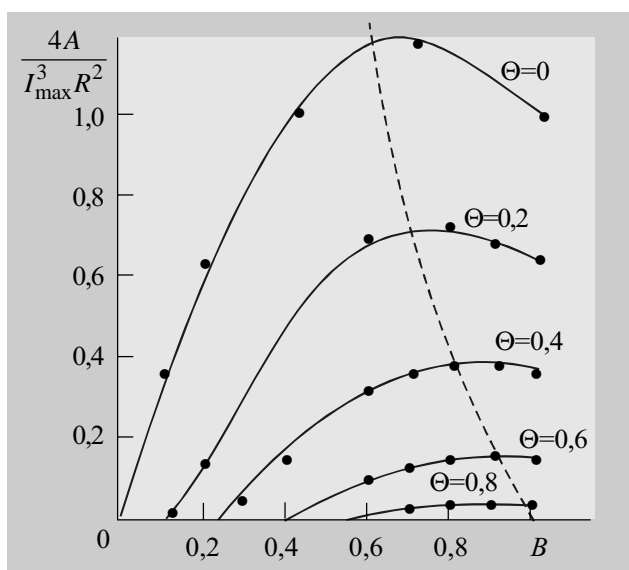


Рис. 1. Зависимость критериального соотношения  $4A/(I_{\max}^3 R^2)$  от относительного рабочего тока при заданных значениях  $\Theta$

Из условия  $\frac{dA}{dB} = 0$  определим соотношение для оптимального относительного рабочего тока  $B_{\text{опт}}$ , соответствующего максимуму величины критериального соотношения:

$$B_{\text{опт}} = \frac{1}{3} [1 + \sqrt{1 + 3\Theta}]. \quad (6)$$

На рис. 2 представлена зависимость оптимального относительного рабочего тока  $B$  от относительного перепада температуры  $\Theta$  (кривая 11, режим

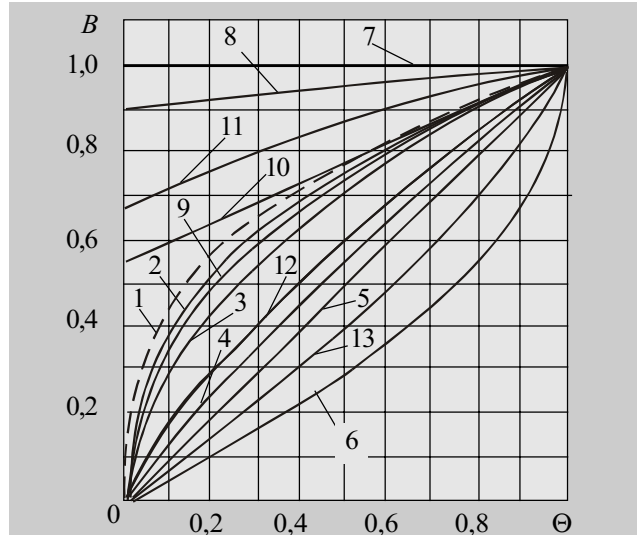


Рис. 2. Зависимость относительного рабочего тока  $B$  от относительного перепада температуры  $\Theta$  для различных режимов работы охлаждающего термоэлемента: 1 — режим  $U_{\min}$  (приближенный); 2 — режим  $U_{\min}$ ; 3 — режим  $I_{\min}$ ; 4 — режим  $E_{\max}$ ; 5 — режим  $Q_0/I^2$ ; 6 — режим  $Q_0=0$ ; 7 — режим  $Q_{0\max}$ ; 8 — режим  $q_{\min}$ ; 9 — режим  $K_{\text{опт}}$ ; 10 — режим  $\Pi_{\text{опт}}$ ; 11 — режим  $A_{\text{опт}}$ ; 12 — режим  $D_{\text{опт}}$ ; 13 — режим  $B_{\text{опт}}$

$A_{\text{опт}}$ ), а также кривые 1—10 для известных режимов работы при заданной геометрии ветви термоэлемента  $l/s = \text{const}$  ( $l$  — высота,  $s$  — площадь поперечного сечения).

Режим  $A_{\text{опт}}$  лежит в области возможных режимов между режимами  $q_{\min}$  и  $\Pi_{\text{опт}}$  и по сравнению с характерным режимом  $q_{\min}$  для  $\Theta = 0,5$  обеспечивает уменьшение рабочего тока на 10%, увеличение холодильного коэффициента на 20% при увеличении количества термоэлементов не более чем на 4%. Режим  $A_{\text{опт}}$  может быть использован, когда преобладающим требованием является обеспечение минимального количества термоэлементов (минимальная масса ТЭУ) при приемлемом энергопотреблении.

В некоторых случаях проектирования ТЭУ, когда преобладающим требованием является обеспечение энергетической эффективности, близкой к режиму  $E_{\max}$ , при одновременном обеспечении большей холодопроизводительности, можно использовать область режимов между  $E_{\max}$  и  $I_{\min}$ .

Указанные выше требования можно записать в виде критерия

$$D = \left( \frac{Q_0}{W} \frac{Q_0}{I} \right) = \frac{Q_0^2}{I^2 U}. \quad (7)$$

Подставив (2), (3), (4) в (7), получим:

$$D = \frac{1}{4} I_{\max} R \frac{(2B - B^2 - \Theta)^2}{B^2 \left( B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right)}, \quad (8)$$

или

$$\frac{4D}{I_{\max} R} = \frac{(2B - B^2 - \Theta)^2}{B^2 \left( B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right)}. \quad (9)$$

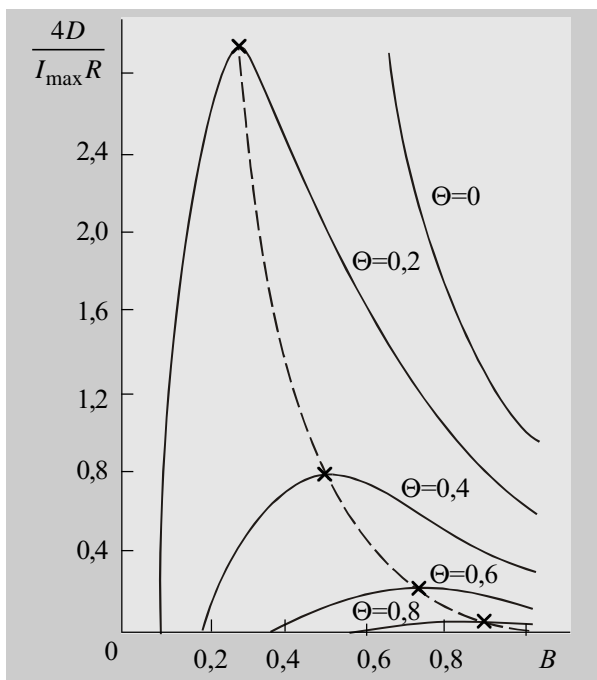


Рис. 3. Зависимость критериального соотношения  $4D/(I_{\max}R)$  от относительного рабочего тока при заданных значениях  $\Theta$

На рис. 3 представлена зависимость величины  $4D/(I_{\max}R)$  от  $B$  при заданных  $\Theta$ . Характерной особенностью кривых является наличие максимума (см. штриховую кривую).

Из условия  $\frac{dD}{dB} = 0$  получим соотношение для определения оптимального относительного рабочего тока  $B_{\text{опт}}$ , соответствующее максимуму величины критериального отношения:

$$B^3 + 2B^2 \left( 1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right) - 3B\Theta - 2\Theta^2 \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} = 0. \quad (10)$$

Режим  $D_{\text{опт}}$  (см. рис. 2, кр. 12) лежит в области между режимами  $E_{\max}$  и  $I_{\min}$ , и по сравнению с характерным режимом  $E_{\max}$  для  $\Theta=0,5$  здесь при увеличении рабочего тока на 13% количество термоэлементов уменьшается на 18% при уменьшении холодильного коэффициента не более чем на 2,5%. Режим  $D_{\text{опт}}$  может быть использован, когда превалирующим требованием является экономичность при приемлемом количестве термоэлементов.

В случае, когда превалирующим требованием является обеспечение минимального тока при максимальной величине рабочего напряжения, можно, кроме конструктивных факторов (геометрии ветви термоэлемента), использовать область токовых режимов охлаждающего термоэлемента, лежащих между характерными  $E_{\max}$  и  $Q_0=0$ .

Эта область режимов при  $B < \Theta$  считалась нерациональной, т. к. наряду с уменьшением холодильного коэффициента уменьшается холодопроизводительность, что приводит к росту количества термоэлементов. Однако в некоторых случаях, когда основным из ограничительных факторов является уменьшение величины рабочего тока при повышенном напряжении питания и незначительном увеличении энергозатрат, этот режим является предпочтительным. Тогда ука-

занные выше требования в окончательном виде можно записать в виде критерия

$$B = \frac{Q_0}{I^3}. \quad (11)$$

Подставив (2), (3) в (11), получим:

$$\frac{2I_{\max}}{R} B = \frac{2B - B^2 - \Theta}{B^3}. \quad (12)$$

На рис. 4 представлена зависимость величины  $(2I_{\max}/R)B$  от относительного рабочего тока при заданных  $\Theta$ . Характерной особенностью кривых является наличие максимума (см. штриховую кривую).

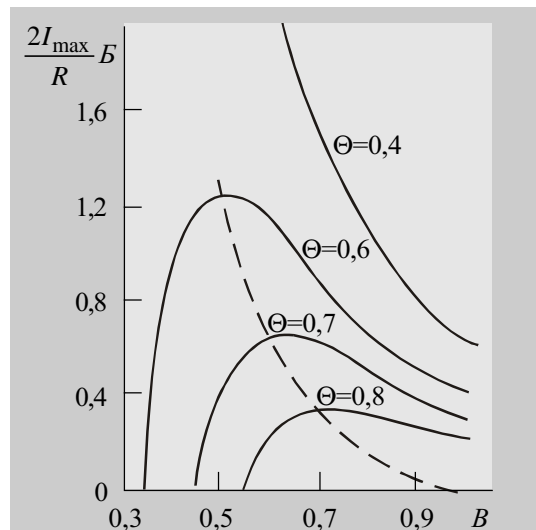


Рис. 4. Зависимость критериального соотношения  $(2I_{\max}/R)B$  от относительного рабочего тока при заданных значениях  $\Theta$

Из условия  $\frac{dB}{dB} = 0$  получим соотношение для определения оптимального относительного рабочего тока  $B_{\text{опт}}$ , соответствующее максимуму величины критериального соотношения.

$$B = 2 - \sqrt{4 - 3\Theta}. \quad (13)$$

Режим  $B_{\text{опт}}$  (см. рис. 2, кр. 13) лежит в области между режимами  $E_{\max}$  и  $Q_0=0$  и по сравнению с характерным режимом  $E_{\max}$ , например, для  $\Theta=0,5$  обеспечивает уменьшение рабочего тока на 25%, увеличение напряжения питания на 60% при уменьшении холодильного коэффициента до 15%.

При выборе режима работы охлаждающего термоэлемента необходимо проводить комплексную оценку основных характеристик ТЭУ, таких как холодильный коэффициент  $E$ , холодопроизводительность  $Q_0$  и количество пар термоэлементов  $n$ .

Удобно представить эти характеристики через относительные величины  $E/E_{\max}, Q_0/Q_{0\max}, n/n_{\max}$  в зависимости от относительного перепада температур  $\Theta$ , что позволяет вести экспрессную сравнительную оценку основных характеристик ТЭУ для различных токовых режимов. (Здесь  $n_{\max} = n$  в режиме  $B_{\text{опт}}$ .)

На рис. 5 представлена зависимость отношения режимов  $E/E_{\max}$  от  $\Theta$  для известных (рис. 2, 1—10) и рассматриваемых (11—13) режимов. Если превалирующим требованием является экономичность ТЭУ,

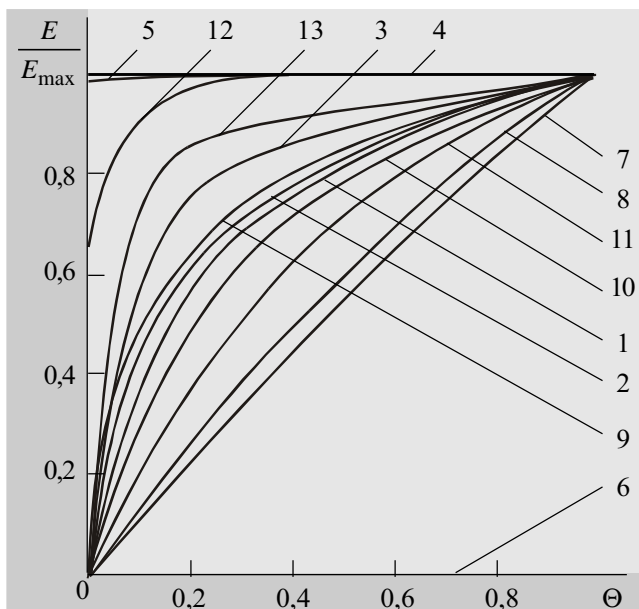


Рис. 5. Зависимость отношения  $E/E_{\max}$  от относительного перепада температуры  $\Theta$  для различных режимов:

1 —  $U_{\min}$  (~); 2 —  $U_{\min}$ ; 3 —  $I_{\min}$ ; 4 —  $E_{\max}$ ; 5 —  $Q_0/I^2$ ; 6 —  $Q_0=0$ ; 7 —  $Q_{0\max}$ ; 8 —  $q_{\min}$ ; 9 —  $K_{\text{опт}}$ ; 10 —  $\Pi_{\text{опт}}$ ; 11 —  $A_{\text{опт}}$ ; 12 —  $D_{\text{опт}}$ ; 13 —  $B_{\text{опт}}$

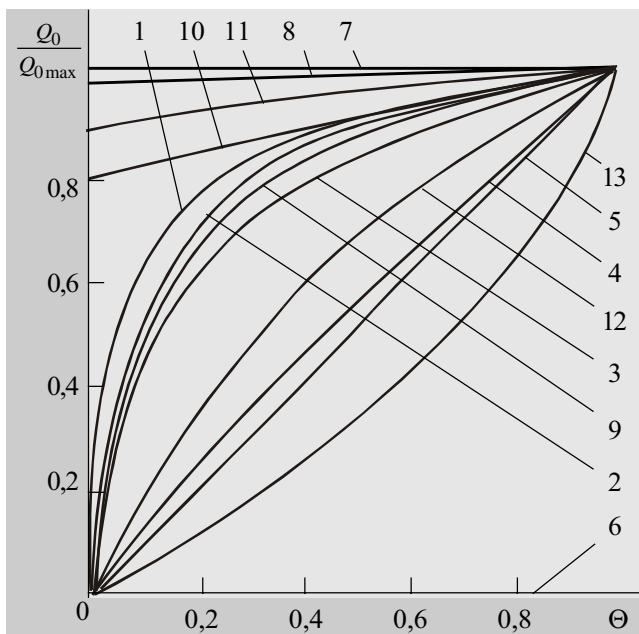


Рис. 6. Зависимость отношения  $Q_0/Q_{0\max}$  от  $\Theta$  для различных режимов (обозначения как в рис. 5)

то необходимо выбирать токовые режимы работы, близкие к режиму  $E_{\max}$  (4), например, 5, 12, 13.

На рис. 6 представлена зависимость отношения  $Q_0/Q_{0\max}$  от  $\Theta$  для тех же режимов. В этом случае если превалярующим требованием является обеспечение наибольшей холодопроизводительности ТЭУ, то необходимо выбирать токовые режимы, близкие к режиму  $Q_{0\max}$  (7), например, 10, 11, 8.

На рис. 7 для этих же режимов представлена зависимость отношения  $n/n_{\max}$  от  $\Theta$ . Если превалярующим требованием является уменьшение количества термоэлементов в ТЭУ, то необходимо выбирать токовые режимы, близкие к режиму  $Q_{0\max}$ .

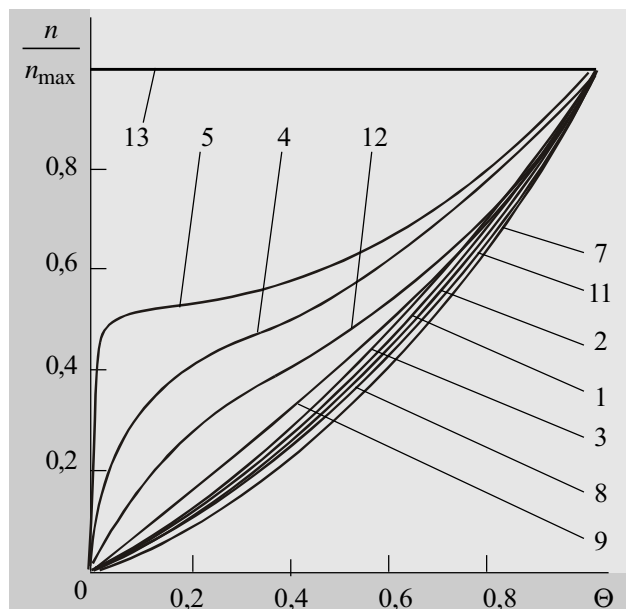


Рис. 7. Зависимость отношения  $n/n_{\max}$  от  $\Theta$  для различных режимов (обозначения как в рис. 5)

| Нумерация режимов в соответствии с рис. 2 | Условное обозначение режима   | Основные характеристики |         |         |                |          |           |
|-------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|---------|---------|----------------|----------|-----------|
|                                           |                               | $B$ , отн. ед.          | $I$ , А | $U$ , В | $E$ , отн. ед. | $W$ , Вт | $n$ , пар |
| 1                                         | $U_{\min}$ (~) (приближенный) | 0,76                    | 1,88    | 1,65    | 0,32           | 3,125    | 17,6      |
| 2                                         | $U_{\min}$                    | 0,78                    | 1,93    | 1,66    | 0,31           | 3,22     | 17,2      |
| 3                                         | $I_{\min}$                    | 0,71                    | 1,76    | 1,67    | 0,34           | 2,94     | 18,7      |
| 4                                         | $E_{\max}$                    | 0,53                    | 1,31    | 1,97    | 0,39           | 2,56     | 27,8      |
| 5                                         | $Q_0/I^2$                     | 0,50                    | 1,24    | 2,10    | 0,38           | 2,63     | 31,1      |
| 6                                         | $Q_0=0$                       | 0,29                    | 0,72    | —       | —              | —        | —         |
| 7                                         | $Q_{0\max}$                   | 1,00                    | 2,47    | 1,85    | 0,22           | 4,54     | 15,5      |
| 8                                         | $q_{\min}$                    | 0,96                    | 2,38    | 1,79    | 0,23           | 4,35     | 15,6      |
| 9                                         | $K_{\text{опт}}$              | 0,73                    | 1,81    | 1,68    | 0,33           | 3,00     | 18,2      |
| 10                                        | $\Pi_{\text{опт}}$            | 0,77                    | 1,91    | 1,665   | 0,315          | 3,17     | 17,4      |
| 11                                        | $A_{\text{опт}}$              | 0,86                    | 2,13    | 1,70    | 0,28           | 3,57     | 16,2      |
| 12                                        | $D_{\text{опт}}$              | 0,60                    | 1,48    | 1,78    | 0,38           | 2,63     | 22,8      |
| 13                                        | $B_{\text{опт}}$              | 0,40                    | 1,00    | 3,18    | 0,33           | 3,125    | 55,6      |

Для наглядности сравнительного анализа технических характеристик ТЭУ приведем данные расчета для различных токовых режимов при следующих исходных данных:

- требуемая холодопроизводительность  $Q_0=1,0$  Вт;
- температура теплопоглощающего спая  $T_0=260$  К;
- температура тепловыделяющего спая  $T=300$  К.

При этом  $\Delta T_{\max}=80$  К;  $\Theta=0,5$ ;  $\Delta T_{\max}/T_0=0,3$ ;  $l/s=20$ ;  $I_{\max}=2,47$  А;  $R=2,1 \cdot 10^{-2}$  Ом;  $e=2 \cdot 10^{-4}$  В/К; электропроводность ветви термоэлемента 950 См/см.

Данные расчетов сведены в таблицу.

\*\*\*

Таким образом, многофакторный критериальный подход к определению режимов работы охлаждающего термоэлемента является методом поиска промышленных режимов и обеспечивает возможность рационального проектирования термоэлектрических охлаждающих устройств.

Приведенные соотношения позволяют при заданном относительном перепаде температур  $\Theta$  определить величину относительного рабочего тока  $B$  для режимов с различными превалирующими критериями и тем самым оценить основные технические характеристики ТЭУ для соответствующих режимов.

Рекомендации по определению рациональной области использования различных режимов работы ТЭУ позволяют вести оптимизированное проектирование ТЭУ для охлаждения РЭА.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Стилбанс Л. С. Полупроводниковые термоэлектродоильники.— Л.: Изд-во АН СССР, 1957.
2. Покорный Е. Г., Щербина А. Г. Расчет полупроводниковых охлаждающих устройств — Л.: Наука, 1969.

3. Каганов М. А., Привин М. Р. Термоэлектрические тепловые насосы.— Л.: Энергия, 1970.
4. Сомкин М. Н., Зайков В. П., Вайнер А. Л. Возможности единого подхода к режимам работы охлаждающего термоэлемента // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО.— 1984.— Вып. 1.— С. 95—106.
5. Зайков В. П., Дейнега В. Т., Коноплев И. Д., Водолагин В. Ю. Режим работы термоэлектрического устройства, обеспечивающий минимальное остаточное газовыделение // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОВР (ТРТО).— 1989.— Вып. 4.— С. 91—95.
6. Зайков В. П., Киншова Л. А. Комплексный подход при выборе режима работы термоэлектрического охлаждающего устройства // Тепловые режимы и охлаждение РЭА (ТРИО).— 1999.— Вып. 1.— С. 47—49.
7. Зайков В. П., Ефремов В. И. Критериальный подход к выбору режима работы термоэлектрического устройства для систем термостабилизации // Там же.— 2001.— Вып. 1.— С. 47—50.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



**Третья ежегодная выставка  
оборудования и технологий  
для АСУ ТП и встраиваемых систем**

- ✓ Промышленные компьютеры и системы, измерительные приборы
- ✓ Электронные компоненты для жестких условий эксплуатации
- ✓ Оборудование для промышленных сетей, Web-технологий в АСУ ТП
- ✓ SCADA-системы и системы реального времени
- ✓ Услуги по системной интеграции в области АСУ ТП
- ✓ Оборудование для встраиваемых и бортовых систем сбора данных и управления

**9 – 11 декабря 2003 г.**

Центр международной торговли

Москва, Краснопресненская набережная, 12. Метро «Улица 1905 года».

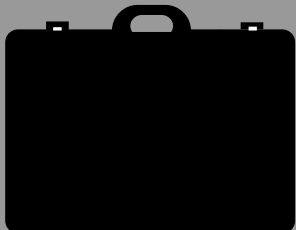
Телефон: (095) 234-2210  
Факс: (095) 234-2226  
E-mail: info@pta-expo.ru  
www.pta-expo.ru

Во время работы выставки состоится  
Всероссийская конференция  
по АСУ ТП и встраиваемым системам

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции

- Исследование кинетики десорбционной очистки поверхности кремниевых пластин в перекисно-аммиачных растворах. *Ю. Г. Полтавцев, П. Т. Вирченко, В. В. Костюк* (Украина, г. Киев)
- Коррекция "силового" размещения компонентов. *П. И. Дмитриев, С. В. Зудин, М. С. Лузин, О. Б. Полубасов* (Россия, г. Санкт-Петербург)
- Портативный плазменно-ионизационный газоанализатор. *В. Ф. Рыжков* (Украина, г. Киев)
- Получение электрокоммутационных слоев керамических теплопереходов методом детонационного напыления. *А. А. Ащеулов, А. Х. Дунаенко, В. И. Пундик, И. С. Романюк, В. Д. Фотий* (Украина, г. Черновцы)
- Конструкторская реализация непроволочных переменных резисторов с заданными функциональными свойствами. *В. М. Николаенко, А. В. Задерейко, О. В. Николаенко* (Украина, г. Одесса)
- Выбор цифровой камеры для оптического микроскопа. *В. Н. Боровицкий* (Украина, г. Киев)
- Радиофизические аспекты генерирующих структур с элементами микромеханики. *В. И. Юрченко, С. Д. Воторотин* (Россия, г. Томск)



в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

К. т. н. Т. С. ЛЕБЕДЕВА, П. Б. ШПИЛЕВОЙ,  
д. т. н. И. Д. ВОЙТОВИЧ

Украина, г. Киев, Институт кибернетики им. В. М. Глушкова  
E-mail: d220@public.icyb.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
19.03 2003 г.

Оппонент к. ф.-м. н. А. В. АНДРИЯНОВ  
(ОНИПУ, г. Одесса)

## ПРИМЕНЕНИЕ КОНТРОЛИРУЕМОГО АНОДНОГО ОКИСЛЕНИЯ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПЛЕНОК И ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

*Предложен метод экспресс-контроля для технологии пленок и тонкопленочных структур, а также для контроля равномерности ряда технологических процессов.*

Для успешного контроля тонкопленочных технологий необходимо получение информации о составе и толщине слоев, резкости границ раздела. Разработаны многочисленные физические методы исследования тонкопленочных структур — микроскопические, спектрометрические и другие. Такие исследования расширяют и углубляют знания о взаимосвязи физических характеристик, технологических режимов и рабочих параметров тонкопленочных устройств. Однако из-за сложности, трудоемкости и дороговизны этих методов их не так-то легко использовать в качестве оперативного метода для экспресс-контроля, который необходим каждой тонкопленочной лаборатории.

Не так давно для исследования многослойных структур был предложен метод, основанный на контроле скорости роста напряжения при анодном окислении [1] с использованием постоянного тока. Он получил название метода анодной спектроскопии. (Это не совсем корректно, метод не является спектроскопическим в классическом смысле. Правильнее было бы говорить о методе исследования тонких пленок и тонкопленочных структур методом контролируемого анодного окисления. Однако термин «анодная спектроскопия» уже прижился, и в данной работе мы будем использовать оба термина.)

В последние годы идею метода нам удалось значительно развить и воплотить в действующих установках для конкретных исследований [2—4]. Было показано, что он применим для исследования поверхностных слоев, тонких слоев и границ раздела, а также для контроля структуры формируемых анодных пористых пленок. Метод отличается от общепринятых простотой, дешевизной и быстротой. Время анализа занимает около 10 минут. В то же время метод весьма точный — при тщательной разработке методик исследований разрешение по толщине составляет 0,5 — 0,1 нм.

Итак, основой метода является анализ зависимости скорости роста напряжения  $dV/dt$  при анодном окислении в режиме постоянного тока. Как известно, при формировании сплошного анодного оксидного слоя

$$dV/dt = \lambda j (M E_{dif} / nZ\rho F),$$

где  $\lambda$  — эффективность формирования;

$j$  — плотность тока;

$M$  — молекулярный вес оксида;

$E_{dif}$  — дифференциальная напряженность поля в растущем анодном оксиде;

$nZ$  — валентность реакции окисления;

$\rho$  — плотность оксида;

$F$  — число Фарадея.

Толщина пленки  $\Delta d$ , подвергшейся окислению, которой соответствует рост напряжения  $\Delta V$  на профиле анодирования, вычисляется как  $\Delta d = \Delta V / (dx/dV)$ , где  $dx/dV$  — величина, характеризующая анодное окисление данного материала [4].

Контролируя  $dV/dt(t)$  или  $dV/dt(V)$  при формировании пористого оксида алюминия, можно отследить кинетику перехода от формирования сплошной (барьерной) пленки к формированию пористой, а также напряжение  $V_p$ , при котором устанавливается режим формирования пор. То есть  $(dV/dt)_p = 0$ , и в то время как высота стенок пор нарастает, донная часть пор имеет постоянную толщину  $h_p = V_p K$  ( $K = 1,4$  нм/В). Если, сформировав пористый слой оксида алюминия, заменить электролит на такой, в котором формируется сплошной окисел, то толщина оксида при дальнейшем окислении образца будет увеличиваться не по всей поверхности образца, а только на дне пор. При этом ток формирования протекает только по площади, равной сумме площадей пор  $S_1$ , и величина  $(dV/dt)_1$ , пропорциональная плотности тока, относится к величине  $(dV/dt)_0$  при формировании плотного оксида на всей площади образца  $S_0$  как  $S_0/S_1$ . Таким образом, измерив  $dV/dt$ , мы получаем возможность выяснить, какую часть всей анодируемой поверхности занимает площадь пор.

Обычно для оценки пористости проводят электроно-микроскопические исследования, что требует специального оборудования и длительного времени для проведения анализа. Предлагаемый нами метод является простым и быстрым методом экспресс-контроля *in situ*, что особенно важно при отработке режимов анодирования.

### Техника эксперимента

Изготовление структур Nb/AlO<sub>x</sub>—Al/Nb производилось в едином вакуумном цикле в камере, оборудованной двумя магнетронами и ионным источником для очистки подложек. Чистота материала мишеней

составляла 99,99% для Nb и 99,999% для Al. Предварительный вакуум, получаемый с помощью турбомолекулярного насоса, составлял  $8 \cdot 10^{-5}$  Па. Перед осаждением каждого слоя в течение 3 минут проводилось предварительное распыление с целью очистки поверхности мишеней. Использовался аргон чистотой 99,9%, подаваемый в камеру через вымораживатель с жидким азотом. Давление аргона при напылении составляло 0,6 Па. Скорость осаждения ниобия составляла 4 нм/с, алюминия — 3 нм/с. Толщина нижнего и верхнего слоев ниобия составляла около 250 и 50 нм, соответственно, толщина слоя Al — от 5 до 35 нм. Окисление алюминия производили в тлеющем разряде кислорода между алюминиевой мишенью магнетрона и подложкой.

Анодное окисление проводили в специально разработанной капиллярной двухэлектродной электролитической ячейке с платиновым катодом, оснащенной микрометрическим приводом для позиционирования образца. Тестовые площадки в  $1 \text{ мм}^2$  формировались в виде “окон” в фоторезисте или протравливались в виде “флажков”. Для формирования сплошных анодных оксидных пленок (АОП) использовался электролит на основе пентабората аммония и этиленгликоля [1], а для пористых АОП алюминия — водный 3%-ный раствор щавелевой кислоты.

Питание электролитической ячейки и вывод  $V$  и  $dV/dt(t)$  на самописец осуществлялись при помощи специально созданного прибора, обеспечивающего получение бесшумовых профилей анодирования. Плотность тока при проведении анодирования составляла  $1 \text{ мА/см}^2$ , размер исследуемых площадей —  $1 \text{ мм}^2$ , при этом значение  $dV/dt$  для ниобия составляло  $0,26 \text{ В/с}$ . На рисунках приведено нормированное значение  $dV/dt$ .

### Исследование структур Nb/AlO<sub>x</sub>—Al/Nb с разной толщиной Al

Исследование многослойных структур на основе ниобия и алюминия проводилось нами в рамках отработки технологии криоэлектронных тонкопленочных устройств на базе джозефсоновских туннельных контактов Nb/AlO<sub>x</sub>—Al/Nb. При этом метод анодной спектроскопии использовался как для исследования структур, так и в качестве метода экспресс-контроля для сопровождения технологии [2—4]. Профили анодирования структур Nb/AlO<sub>x</sub>—Al/Nb с разной толщиной алюминия приведены на **рис. 1**.

Сначала фронт анодирования проходит через верхнюю пленку ниобия толщиной 40 нм, при этом величина  $dV/dt$  постоянна. (Этот участок на рисунке опущен.) Как только фронт анодирования достигает слоя AlO<sub>x</sub>—Al, величина  $dV/dt$  резко возрастает. При малой толщине алюминия пик плазменного окисла выявлен слабо (*a*). При увеличении толщины алюминия пик увеличивается до некоторой величины и далее практически не изменяется (*c*, *d*, *e*).

Плато алюминия при малых толщинах вырождено в минимум с  $dV/dt$  меньше  $(dV/dt)_{\text{Al}}$  (рис. 1, *a*, *b*). Только при толщине алюминия больше 10 нм наблюдается четкий участок  $(dV/dt)_{\text{Al}}$  (*c*, *d*, *e*). Склон пика, который соответствует границе раздела Al/Nb, резкий для всех исследованных толщин алюминия.

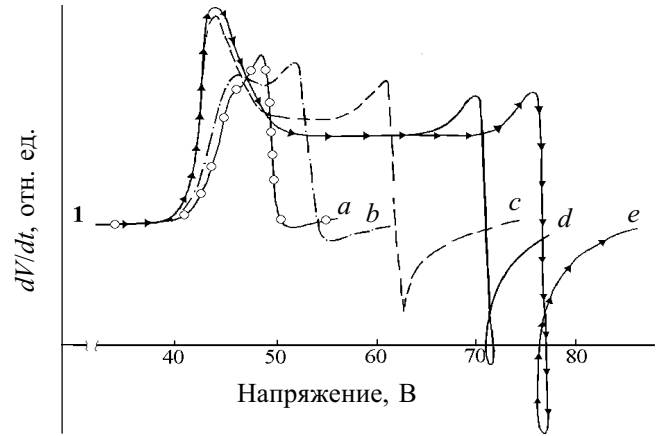


Рис. 1. Профили анодирования структур Nb/AlO<sub>x</sub>—Al/Nb с различной толщиной алюминия:

*a* — 5,3 нм; *b* — 8,9 нм; *c* — 17,8 нм; *d* — 26,7 нм; *e* — 31,2 нм

Перед этим склоном для данной серии образцов наблюдается небольшой максимум. Мы считаем, что он связан с наличием слоев с геттерированными примесями на поверхности нижнего слоя ниобия, которые формируются до напыления алюминия. Подтверждением этому является наблюдавшийся нами пик на профилях анодирования многослойных пленок Nb/Nb [4]. С помощью вторичной ионной масс-спектрометрии [5] на границе Al/Nb в аналогичных структурах был также обнаружен слой адсорбента толщиной в несколько нанометров.

Трансформация минимума на границе Al/Nb<sub>1</sub> связана с особенностями образования сложного трехмерного окисла NbO<sub>x</sub>+AlO<sub>y</sub> при анодировании структуры Al/Nb. По мере увеличения толщины пленки алюминия минимум углубляется и становится более острым. При толщине алюминия 300 нм и более минимум приобретает вид петли.

Нужно отметить, что минимум на кривой скорости роста напряжения  $dV/dt$  для структур Al/Nb был предсказан теорией Прингла [6] и наблюдался экспериментально [1, 7]. Реверс напряжения при анодном окислении многослойных структур в режиме постоянного тока, насколько нам известно, никем ранее не наблюдался.

### Исследование границ раздела слоев

На **рис. 2** приведены профили анодирования структур Nb/Al/Nb и Nb/AlO<sub>x</sub>—Al/Nb, изготовленных плазмой магнетронным осаждением и окислением в плазме магнетрона. Из рисунка видно, что для всех толщин алюминия граница раздела Nb/Al размыта более, чем Nb/AlO<sub>x</sub>.

Оценим толщину переходного слоя между пленкой верхнего слоя ниобия и пленкой алюминия в образце Nb/Al/Nb. Величина падения напряжения на переднем склоне барьерного пика  $\Delta V_{\text{Al/Nb}}$ , как видно из рисунка, составляет 5,0 В. Известно [6], что постоянные анодирования  $(dx/dV)_{\text{Nb}}=8,8 \text{ нм/В}$ ,  $(dx/dV)_{\text{Al}}=8,2 \text{ нм/В}$ . Предположив, что для переходного слоя средняя  $(dx/dV)_{\text{Nb/Al}}=1/2[(dx/dV)_{\text{Nb}}+(dx/dV)_{\text{Al}}]$ , получаем ширину границы раздела Nb/Al 4,3 нм. В предположении, что постоянная анодирования  $dx/dV$  окисного слоя для структур Nb/AlO<sub>x</sub>—Al/Nb равна  $1,3 \text{ нм/В}$  (как для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), оцененная аналогичным образом толщина переходного слоя между верхним электродом и AlO<sub>x</sub> составляет 2,7 нм.

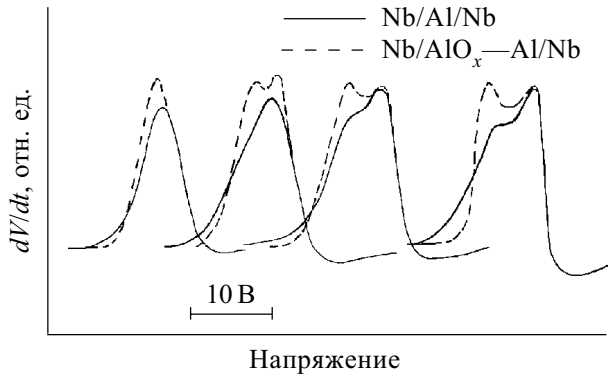


Рис. 2. Профили анодирования структур Nb/Al/Nb и Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb

Полученный нами результат согласуется с данными исследований джозефсоновских структур другими методами [5, 7]. Большая ширина переходной области Nb/Al связана с повреждением верхних слоев барьера в процессе напыления верхнего слоя ниобия, с загрязнением поверхности Nb остаточными газами, интердиффузией ниобия и алюминия, а также с большей шероховатостью поверхности алюминия, чем AlO<sub>x</sub>.

**Исследование формирования окисных слоев**

Тонкие окисные слои в многослойных пленочных структурах являются ключевым звеном работы многих микроэлектронных приборов, в т. ч. джозефсоновских. Однако поскольку тонкий барьер AlO<sub>x</sub>-Al заключен между ниобиевыми электродами, выполнить его исследование обычными методами чрезвычайно сложно. Использование профилей анодирования позволяет успешно решить эту задачу.

На рис. 3 представлены профили анодирования структур Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb, изготовленных магнетронным осаждением и термическим окислением в кислороде при давлении 1,3·10<sup>2</sup> Па. Анализ профилей анодирования показывает, что по мере увеличения времени окисления  $t_{ок}$  происходит рост ширины и высоты пика оксида, однако высота пика увеличивается незначительно, стехиометрия слоев оксида остается небольшой. Мы связываем это с тем, что длительное время термического окисления приводит к загрязнению барьерного слоя остаточными газами вакуумной камеры [4].

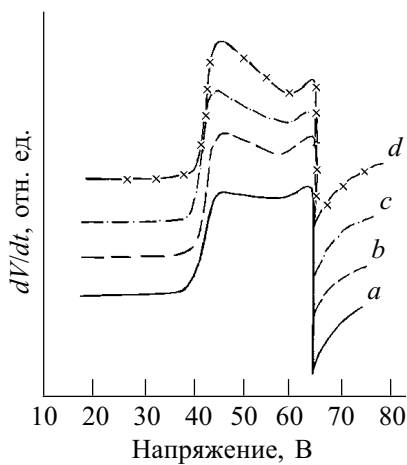


Рис. 3. Профили анодирования структур Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb с различными режимами термического окисления: а — без окисления; б —  $t_{ок}=15$  мин; с —  $t_{ок}=30$  мин; д —  $t_{ок}=60$  мин

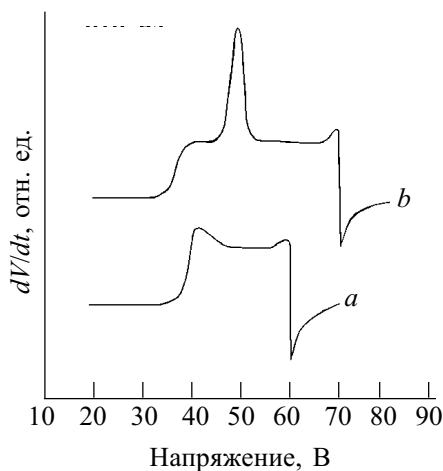


Рис. 4. Профили анодирования структур Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb и Nb/Al-AlO<sub>x</sub>-Al/Nb. Термическое окисление алюминия,  $t_{ок}=45$  мин

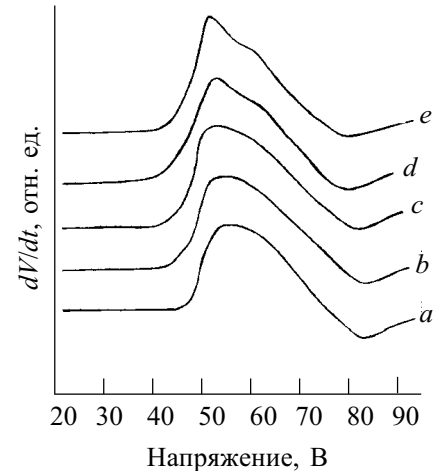


Рис. 5. Изменение профиля анодирования структуры Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb при термической обработке

В качестве альтернативного метода окисления мы воспользовались окислением в тлеющем разряде. Разряд формировался между алюминиевой мишенью магнетрона и окисляемой поверхностью. Давление кислорода составляло 0,6 Па, время окисления варьировали от 4 до 15 секунд. Заметим, что на профилях анодирования структур Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb, барьер которых сформирован в плазме магнетрона, пик оксида по сравнению с термическим окислением значительно выше [4]. Мы связываем это с увеличением стехиометрии и сплошности барьера.

Для выявления влияния напыления верхнего электрода на окисный слой исследовались, наряду со структурами Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb, также структуры Nb/Al-AlO<sub>x</sub>-Al/Nb (рис. 4). И те, и другие изготавливались магнетронным способом с термическим окислением в едином вакуумном цикле. Единственным отличием было осаждение дополнительного слоя алюминия толщиной от 1 до 10 нм.

На профилях анодирования структур Nb/Al-AlO<sub>x</sub>-Al/Nb при толщине дополнительного алюминия более 5 нм ясно видно два плато алюминия — перед пиком оксида и после него. Примечательно то, что на профилях анодирования структур с дополнительным алюминием (b) пик оксида значительно выше, чем для структур Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb (a). Очевидно, осаждение пленки алюминия меньше повреждает окисный слой, чем осаждение ниобия.

**Исследование стабильности структур Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb при термической обработке**

Яркой иллюстрацией информативности метода анодной спектроскопии при исследовании тонкопленочных структур являются результаты, полученные нами при изучении влияния термической обработки на стабильность джозефсоновских контактов Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb. При их изготовлении использовались электронно-лучевое напыление и термическое окисление. Подробно эта технология описана в [2]. (Отметим, что электронно-лучевой технологией нам не удалось получить джозефсоновские контакты высокого качества.)

Профили анодирования джозефсоновских структур Nb/AlO<sub>x</sub>—Al/Nb имели пологие склоны барьерного пика, явный окисный пик на них отсутствовал (рис. 5, а). Мы исследовали профили анодирования таких структур и вольт-амперные характеристики изготовленных на их основе джозефсоновских контактов после отжига при температуре 100, 150, 200, 250 и 270°C в течение 1 часа в термошкафу.

Прогрев при температурах 100 и 150°C (рис. 5, а, б) не приводит к изменению исходного профиля анодирования. После прогрева при 200 и 250°C заметно некоторое расширение склона, соответствующего границе раздела алюминия и базового ниобия (с, d). После прогрева при 270°C наблюдается значительное размытие заднего склона, а пик оксида AlO<sub>x</sub> становится отчетливее (е).

Измерения вольт-амперных характеристик джозефсоновских контактов Nb/AlO<sub>x</sub>—Al/Nb, прошедших термическую обработку, показали [2], что ухудшение их рабочих характеристик заметно уже после прогрева при 200°C. Прогрев при 250 и 270°C приводит к значительному ухудшению качества джозефсоновских контактов — размытию сверхпроводящей щели, увеличению подщелевых токов. Наряду с этим наблюдается увеличение нормального сопротивления контактов, которое экспоненциально связано с толщиной окисного слоя.

Таким образом, полученные нами результаты показывают, что фотолитографическая обработка структур Nb/AlO<sub>x</sub>—Al/Nb при температуре не выше 120°C не приводит к их деградации, но дальнейшее повышение температуры обработки нежелательно.

Результаты наших исследований согласуются с данными других авторов ([7]). По-видимому, термическая обработка при температурах выше 200°C приводит к увеличению межзеренной диффузии на границе алюминия и нижнего слоя ниобия, а также к доокислению слоев оксида алюминия.

**Применение контролируемого анодного окисления для исследования наноструктурированных анодных пористых оксидных пленок на алюминии**

В последнее время внимание специалистов привлекает регулярная сотовая структура пористых анодных оксидных пленок алюминия, которая является уникальной морфологической системой. Варьирование условий формирования пленок позволяет получать системы ячеек, перпендикулярных к поверхности, с размерами от 20 до 1000 нм и размерами пор внутри ячеек от 6 до 300 нм. АОП алюминия с регулярными массивами пор могут быть использованы в качестве масок для наноразмерных мезоскопических структур (“естественная литография”). Проводятся исследования по использованию структурированных пор АОП алюминия для получения наноразмерных нитей, точечных и столбиковых структур.

Применение контролируемого анодного окисления в качестве метода экспресс-контроля при отработке технологии АОП дало нам возможность исследовать особенности роста пористых пленок анодного оксида алюминия при различных режимах их формирования. Выполнение данной работы было связано с разработкой технологии влагочувствительных сенсорных структур.

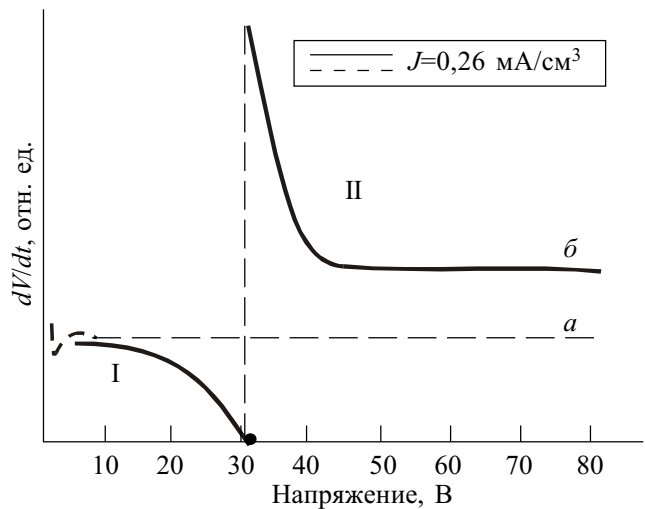


Рис. 6. Профили анодирования Al в электролите на основе пентабората аммония и этиленгликоля (а) и в режиме замены электролита (б)

На рис. 6 приведены зависимости  $dV/dt(V)$ , полученные при окислении алюминия со сменой электролита. Кривая а соответствует росту сплошного оксида на поверхности алюминия в электролите на основе пентабората аммония. Участок I кривой б получен при формировании пористого оксида алюминия в 3%-ной щавелевой кислоте при постоянной плотности тока 0,26 мкА/см<sup>2</sup>. Спадающий участок кривой записывался в течение 2,5 мин, после чего в течение 15 мин при напряжении около 30 В формировался пористый окисел. После промывки образца в деионизованной воде и замены электролита проводилось формирование барьерного оксида в порах AlO<sub>x</sub> (участок II). Измерение  $dV/dt$  на этом участке после установления стационарного режима дает возможность оценить, какую часть всей поверхности образца составляет поверхность пор  $S_1/S_0 = (dV/dt)_0 / (dV/dt)_1$ . Для данного эксперимента  $S_1/S_0 = 0,63$ , что соответствует данным, приведенным в [8].

\*\*\*

Полученные результаты показывают, что метод анодной спектроскопии может быть с успехом применен для получения информации о многослойных тонкопленочных системах и для выявления их зависимости от условий изготовления. Как показано выше, метод анодной спектроскопии, не требуя дорогостоящего оборудования и значительного времени для проведения анализа, дает возможность оперативно отслеживать изменение микроструктурных параметров при изменении технологических режимов, т. е. является простым и удобным методом экспресс-контроля для технологии пленок и тонкопленочных структур, а также для контроля равномерности ряда технологических процессов — осаждения пленок, ионного травления, окисления и др.

Нами выполнена разработка системы экспресс-контроля методом анодной спектроскопии для тонкопленочной ниобий-алюминиевой технологии. Эта система может применяться также и для других тонкопленочных технологий.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Imamura T., Hasuo S. Characterization of Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb junction structures by anodization spectroscopy // IEEE Trans. on Magn.— 1989.— Vol. 25, N 1.— P. 1131—1134.  
 2. Lebedeva T. S., Navala S. Y., Shpilevoy P. B., Vojtovich I. D. Investigation of thin-film cryoelectronic structures by anodization spectroscopy method // Superconductive electronic and biomagnetism (Киев).— 1994.— С. 24—33.  
 3. Войтович И. Д., Лебедева Т. С., Навала С. Я., Шпилевой П. Б. Разработка и применение метода анодной спектроскопии для анализа криоэлектронных тонкопленочных структур // Тр. Украинского вакуумного общества.— 1997.— Т. 3.— С. 371—376.  
 4. Lebedeva T. S., Navala S. Y., Shpilevoy P. B., Vojtovich I. D. Express-control of superconducting microcircuits technology by

anodization spectroscopy method // Jour. de Phys. IV.— 1998.— Vol. 8.— P. Pr. 3—309—315.  
 5. Morohashi S., Kataoka Y., Imamura T., Hasuo S. Secondary ion mass spectrometry for Josephson junction with Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb structure // Appl. Phys. Lett.— 1993.— Vol. 62(11).— P. 1164—1166.  
 6. Pringle J. P. S. The anodic oxidation of superimposed metallic layers: theory // Electrochem. Acta.— 1980.— Vol. 25.— P. 1423—1434.  
 7. Imamura T., Morohashi S. Fabrication of high quality Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb Josephson junction: deposition of thin Al layers on Nb films // IEEE Trans on Supercond.— 1992.— Vol. 2, N 2.— P. 84—93.  
 8. Гаврилов С. А., Сорокин И. Н. Электрохимический анализ строения и кинетики образования пористого анодного оксида алюминия // Электрохимия.— 2000.— Т. 36, № 5.— С. 617—621.

*А. Э. ИВАНЧИКОВ, А. М. КИСЕЛЬ, А. Б. МЕДВЕДЕВА,  
 В. И. ПЛЕБАНОВИЧ, к. ф.-м. н. В. Н. ПОНОМАРЬ, В. Е. ШИКУЛО*

Беларусь, г. Минск, НПО "Интеграл"  
 E-mail: dz\_prod@integral.minsk.by

Дата поступления в редакцию  
 29.05—11.09 2003 г.

Оппонент к. т. н. А. С. ДЗЯН  
 (КУЭИТТ, г. Киев)

## МЕТОДЫ УДАЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ ТРАВЛЕНИЕМ

*Проведен сравнительный анализ методов удаления полимерных загрязнений и описаны механизмы удаления полимера в растворах различного типа.*

Для реализации субмикронных размеров элементов топологии сверхбольших интегральных схем (СБИС) необходимо обеспечить высокую точность не только при формировании рисунка, но и при последующем травлении маскированного слоя диэлектриков или металла.

Травление слоев может производиться либо методом жидкостного травления, либо методом сухого травления. По мере увеличения степени интеграции СБИС применение метода жидкостного травления становится малопримемлемым из-за низкой степени анизотропности. Методы сухого травления более точны и позволяют получить профиль элемента с вертикальными стенками и минимальным боковым уходом под маску фоторезиста. Поэтому в технологии изготовления СБИС широкое применение нашли методы реактивно-ионного и плазмохимического травления (ПХТ) [1, 2].

Получение безуходного вертикального профиля при плазмохимическом травлении возможно благодаря защите боковых стенок создаваемого рисунка пленкой полимера, которая образуется в процессе травления. Формирующийся в плазме пленкообразующий агент осаждается на всю подвергаемую травлению поверхность, но затем в процессе травления под воздействием бомбардировки заряженными частицами удаляется с горизонтальных поверхностей элементов схемы, оставаясь при этом на их вертикальных стенках [2, 3].

Адсорбированная полимерная пленка играет положительную роль лишь непосредственно в процессе травления, резко снижая горизонтальную составляющую скорости травления. В то же время она является нежелательным остаточным загрязнением на боковых стенках сформированных элементов, особенно контактных окон, формируемых в пленке диоксида кремния или фосфоросиликатного стекла. Здесь это приводит к локальному отсутствию контакта "металл-кремний", "металл-металл", к ухудшению металлизации контактных окон и появлению обрывов металлизированных дорожек, к уменьшению эффективной площади контакта.

Возможны два метода удаления полимерных остатков после ПХТ:

— химический метод с использованием различных химикатов;

— термический метод выжигания полимера при температуре 800—900°C в среде кислорода. Этот метод реализуется обычно при проведении операции «оплавление контактов», функционально предназначенной для сглаживания профиля контактного окна и для удаления полимера.

В настоящей работе исследована эффективность указанных методов удаления полимерных остатков при формировании малоразмерных контактных окон методом плазмохимического травления.

### Методика и эксперимент

Исследования проводились в типовом технологическом процессе изготовления интегральной микросхемы с двухуровневой металлизированной разводкой на двух группах контрольных пластин КДБ-12 диаметром 150 мм. В соответствии со схемой, пред-

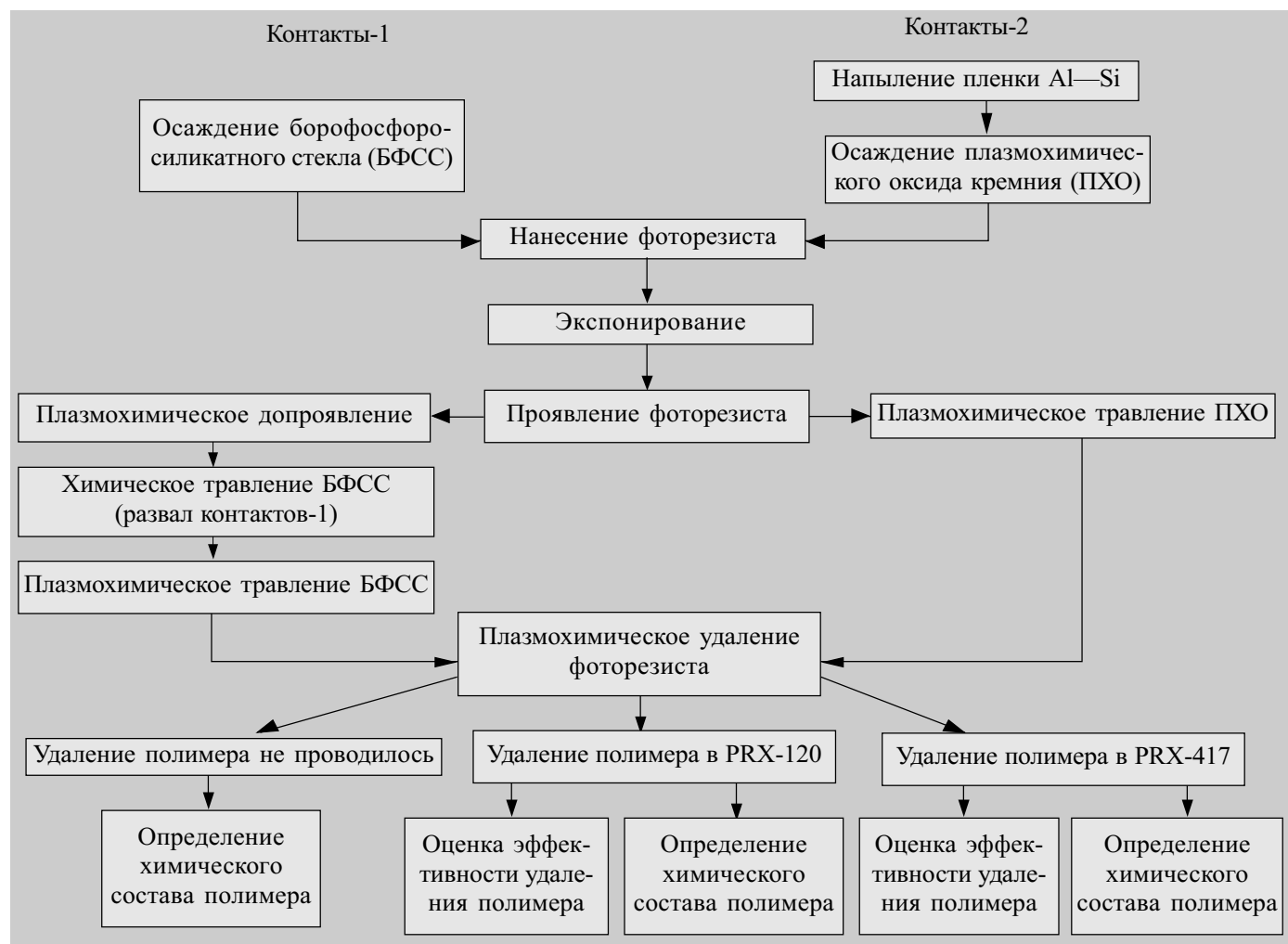


Рис. 1. Схема формирования контактов-1 и -2 на контрольных пластинах

ставленной на **рис. 1**, на первой группе пластин формировались контактные окна (контакты-1) в борофосфоросиликатном стекле (БФСС), на второй группе (контакты-2) — в плазмохимическом оксиде кремния (ПХО).

Каждая группа пластин делилась на три подгруппы, на которых удаление полимерных загрязнений выполнялось в растворах PRX производства фирмы Shipley:

1-я подгруппа — удаление полимерных остатков проводилось в растворе PRX-120 (безводный щелочной органический раствор на основе гидроксилами-на) в течение 30 мин при 80°C;

2-я подгруппа — в растворе PRX-417 (полуводный органический раствор фторида аммония) в течение 30 мин при 22°C;

3-я подгруппа — удаление полимерных остатков не проводилось.

Для обнаружения полимерных остатков в контактных окнах использовался растровый электронный микроскоп фирмы Hitachi. Для установления состава полимерных остатков использовался оже-спектрометр РН1-660 фирмы Perkin Elmer.

С целью изучения механизма воздействия химических растворов PRX на полимер и оценки химической стойкости контактирующих с растворами технологических слоев определялась скорость травления каждого слоя в растворах PRX. Измерение тол-

щины слоев проводилось на автоматизированном измерителе толщины LTS-M/SP фирмы Leica.

Кроме того, на маршруте изготовления изделия БиКМОП при проведении операции «оплавление контактов» были проанализированы две группы рабочих пластин для косвенной (по разбросу толщины окисла в контактных окнах к  $n^+$ -областям) оценки возможности удаления полимера термическим методом. Операция «оплавление контактов» выполнялась на установке «Оксид-3ПО» при температуре 850°C в сухом кислороде в течение 30 мин. На первой группе пластин перед операцией выполнялась обработка в растворе PRX-417, на второй группе обработка не выполнялась. После операции «оплавление контактов» на обеих группах пластин измерялась толщина окисла в контактных окнах к  $n^+$ -областям.

### Результаты и обсуждение

Известно, что на образование полимерных загрязнений при плазмохимическом травлении влияют несколько факторов:

- энергетические параметры плазмы, зависящие от мощности ВЧ-генератора установки;
- соотношение атомов фтора и углерода в газовой смеси, участвующей в процессе травления (чем меньше соотношение F/C, тем больше образуется полимерных загрязнений [2]);
- наличие на поверхности пластины фоторезистивной маски и скорость травления пленки фоторе-

зиста в плазме (плазмохимическая эрозия фоторезиста приводит к образованию углеродсодержащих радикалов и тем самым уменьшает соотношение атомов F/C в газовой смеси);

— время плазмохимического травления (чем больше дополнительное время травления после вскрытия контактов — время перетрава, тем больше в плазме генерируется радикалов  $C_xF_y'$ , которые при рекомбинации могут образовывать полимерные пленки);

— химический состав вытравливаемого и лежащего ниже слоев (наличие металлов приводит к дополнительному образованию металлоорганических полимеров).

Количественные характеристики некоторых из перечисленных факторов приведены в табл. 1, из которой видно, что основное влияние на увеличение ко-

Таблица 1

Характеристики параметров процесса плазмохимического травления для контактов-1 и -2

| Параметр процесса                                          | Контакты-1 | Контакты-2 |
|------------------------------------------------------------|------------|------------|
| Мощность ВЧ-генератора, Вт                                 | 700        | 700        |
| Объемное соотношение компонентов травителя $Ar:CF_4:CHF_3$ | 30:2,5:4   | 30:4:3     |
| Соотношение атомов F/C в используемом травителе            | 3,0        | 3,57       |
| Скорость травления фоторезиста, нм/мин                     | 0,96       | 1,6        |
| Величина перетрава, %                                      | 50         | 100        |

личества полимерных остатков при формировании контактов-2 оказывают время перетрава, а также соотношение компонентов травящей газовой смеси «аргон —  $CF_4$  (хладон-14) —  $CHF_3$  (хладон-23)».

Установлено, что полимерные загрязнения образуются в обоих исследованных процессах плазмохимического травления диэлектриков. Однако в процессе изготовления контактов-1 полимерная пленка возникает лишь в верхней части контактного окна (рис. 2, а), а при формировании контактов-2 полимер распределен по всему профилю контактного окна. При этом высота полимерного образования, которое по своей форме напоминает цилиндр, превышает толщину пленки окисла, подвергаемой плазмохимическому травлению (рис. 3, а).

Из фотографий, представленных на рис. 2 и 3, следует, что полимерные загрязнения из области контактного окна эффективно удаляются при воздействии обеих композиций растворов PRX (PRX-120, PRX-417).

При изучении оже-спектров поверхности пластин до и после обработки в этих растворах выяснилось, что, в отличие от спектра исходного образца с полимерными загрязнениями, в спектрах поверхности пластин после очистки в растворах PRX практически полностью отсутствуют пики, соответствующие атомам фтора и углерода. Спектральный анализ поверхности пластин показал, что полимерные загрязнения, образующиеся при плазмохимическом травлении, состоят, в основном, из фторуглеродных соединений без примесей металлов.

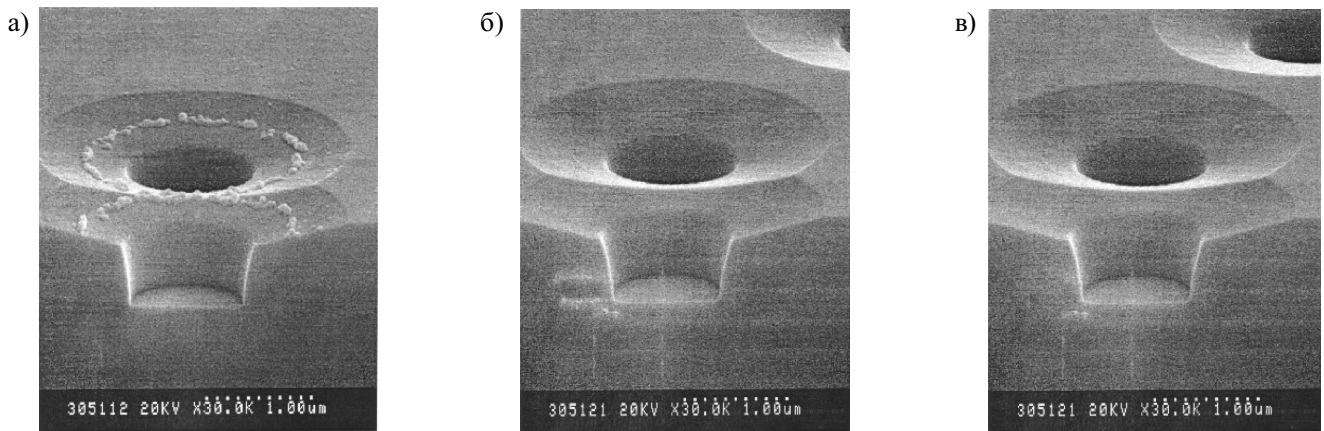


Рис. 2. Фотографии контактов-1:

а — полимер не удален; б — полимер удален в растворе PRX-120; в — полимер удален в растворе PRX-417

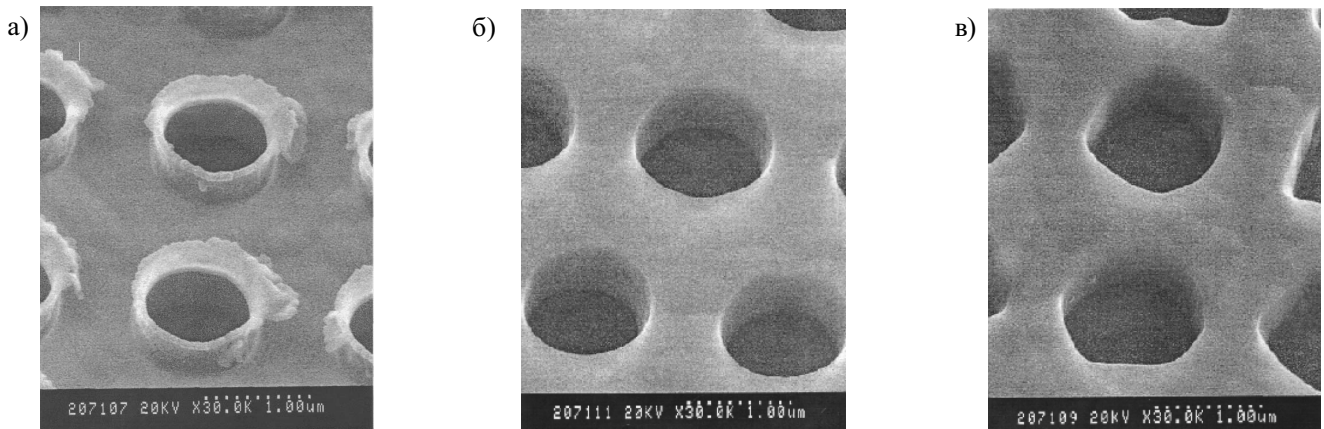


Рис. 3. Фотографии контактов-2:

а — полимер не удален; б — полимер удален в растворе PRX-120; в — полимер удален в растворе PRX-417

Таблица 2

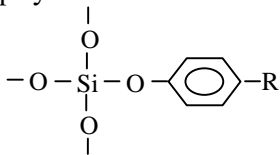
Скорость травления различных технологических слоев в растворах PRX-120 и PRX-417

| Технологический слой           | Скорость травления, нм/мин |         |
|--------------------------------|----------------------------|---------|
|                                | PRX-120                    | PRX-417 |
| Термический диоксид кремния    | 0                          | 0,05    |
| Борофосфоросиликатное стекло   | 0                          | 1,18    |
| Плазмохимический оксид кремния | 0                          | 0,56    |
| Пленка алюминия                | << 0,1                     | << 0,1  |

Анализ скорости травления различных технологических слоев (табл. 2) в исследованных растворах позволяет предположить следующий состав и механизм удаления полимерных остатков.

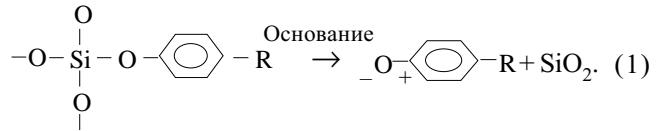
Остатки, образующиеся после плазмохимического травления диоксида кремния, представляют собой сложные полимерные композиции, включающие диоксид кремния и радикалы фоторезистивных смол.

В общем виде полимер может быть представлен формулой

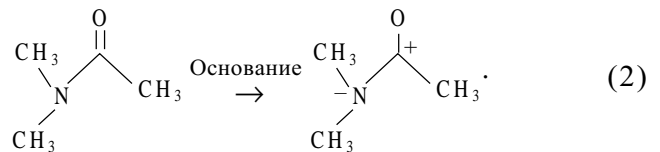


В безводных щелочных растворах (типа PRX-120) не происходит взаимодействия окисных технологи-

ческих слоев с раствором. Удаление полимерных загрязнений в растворе PRX-120 происходит за счет химического растворения пленки полимера в направлении от внешней его поверхности к стенкам контактных окон. При удалении полимера в щелочных растворах органическое основание выступает в качестве сольбизирующего агента по отношению к органическому радикалу полимера и превращает его в поляризованный диполь:



Одновременно под влиянием органического растворителя протонируется и апротонный органический растворитель, что ведет к увеличению диполя растворителя:

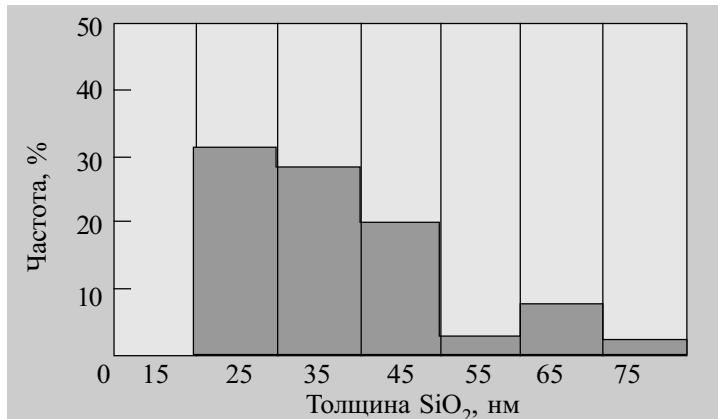


За счет диполь-дипольного взаимодействия двух образующихся диполей происходит растворение полимерной композиции.

Полуводные органические растворы фторида аммония (типа PRX-417) химически взаимодействуют с различными типами окисных слоев, и по мере растворения слоя окисла раствор проникает в пространство между стенкой контактного окна и полимерной

а)

| Описательная статистика |       |
|-------------------------|-------|
| Среднее                 | 33,0  |
| Стандартная ошибка      | 1,2   |
| Медиана                 | 29,6  |
| Мода                    | 22,4  |
| Стандартное отклонение  | 13,1  |
| Дисперсия выборки       | 172,6 |
| Экссес                  | 0,7   |
| Асимметричность         | 1,1   |
| Интервал                | 55,8  |
| Минимум                 | 17,7  |
| Максимум                | 73,5  |
| Счет                    | 119   |



б)

| Описательная статистика |      |
|-------------------------|------|
| Среднее                 | 20,3 |
| Стандартная ошибка      | 0,3  |
| Медиана                 | 20,1 |
| Мода                    | 19,7 |
| Стандартное отклонение  | 3,5  |
| Дисперсия выборки       | 12,4 |
| Экссес                  | 1,0  |
| Асимметричность         | -0,2 |
| Интервал                | 20,4 |
| Минимум                 | 11,3 |
| Максимум                | 31,7 |
| Счет                    | 115  |

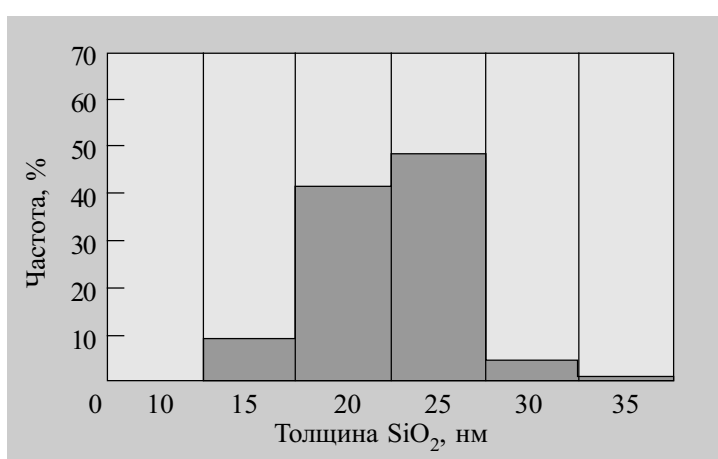
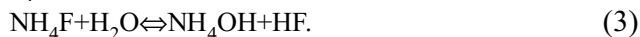


Рис. 4. Гистограмма распределения толщины пленки оксида кремния после операции «оплавление контактов»: а — перед операцией удаление полимера не производилось; б — перед операцией полимер удалялся в растворе PRX-417

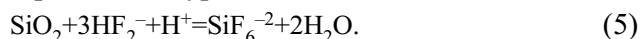
пленкой, что приводит к отслаиванию и удалению полимерной пленки (метод взрыва). В полуводных органических растворах фторида аммония фтористый аммоний гидролизует с образованием основания ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) и фтористоводородной кислоты ( $\text{HF}$ ):



Имеющиеся в растворе фторид-ионы ( $\text{F}^-$ ) реагируют с фтористоводородной кислотой с образованием бифторид-ионов ( $\text{HF}_2^-$ ):



Образование и наличие бифторид-ионов в растворе является причиной подтравки окисного слоя. Травление протекает по уравнению

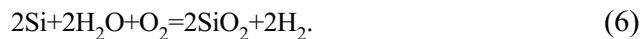


Кроме того, можно предположить, что образование в растворе основания способствует протонизации и увеличению, таким образом, диполя полярного апротонного растворителя по уравнению (2). В свою очередь, такой растворитель способствует сольватации и переводу в раствор органической составляющей полимера.

По значениям толщины пленки оксида кремния в контактных окнах к  $n^+$ -областям после операции «оплавление контактов» на двух группах пластин (с обработкой в растворе PRX-417 до операции и без обработки) можно, по мнению авторов, судить о неравномерности удаления полимера в контактных окнах на группе пластин, прошедших только термическую операцию. На неравномерность удаления полимера указывает большой разброс толщины окисной пленки (от 17,7 до 73,5 нм) в контактных окнах к  $n^+$ -областям кремния (рис. 4, а). Предшествующая операции обработка пластин в растворе PRX-417 на второй группе пластин позволила снизить разброс толщины оксида в контактных окнах от 11,3 до 31,7 нм (рис. 4, б) при тех же условиях окисления.

Наблюдаемая на первой группе пластин (без обработки в растворе PRX-417) высокая скорость роста слоя оксида кремния при выполнении операции

«оплавление контактов» является, по нашему мнению, подтверждением наличия остаточного полимера в областях контактов. То, что полимер ускоряет рост диоксида кремния, говорит о том, что в составе полимера содержится водород. Разрушение пленки полимера при проведении высокотемпературной операции сопровождается образованием паров воды, которые реагируют с кремнием и, тем самым, ускоряют рост слоя диоксида кремния согласно уравнению реакции



#### Закключение

1. Образующиеся после плазмохимического травления диоксида кремния полимерные загрязнения содержат в своем составе углерод, фтор, водород.

2. Использование безводных щелочных растворов органических веществ (типа PRX-120) и полуводных органических растворов фторида аммония (типа PRX-417) позволяет полностью удалить полимерные загрязнения после плазмохимического травления, несмотря на различный механизм взаимодействия растворов с полимером.

3. Удаление полимера полуводными органическими растворами фторида аммония предпочтительнее, т. к. операция может проводиться при комнатной температуре и не требует дополнительной обработки пластин спиртом перед промывкой их в воде.

4. Термическое удаление полимера, реализуемое при выполнении операции «оплавление контактов», не позволяет полностью удалить полимер из контактных окон. Остатки полимерных загрязнений в контактных окнах приводят к невоспроизводимому разбросу толщины пленки оксида кремния, образующейся на вскрытых областях кремния.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Таруи Я. Основы технологии СБИС.— М.: Радио и связь, 1985.
2. Моро У. МикролитогRAFия. Ч. 2.— М.: Мир, 1990.
3. Плазменная технология в производстве СБИС / Под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна.— М.: Мир, 1987.

#### НОВЫЕ КНИГИ

#### Шахгильдян В. В. (под ред.). ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ.— М.: Радио и связь, 2003.— 4-е изд., перераб. и доп.

Рассмотрены вопросы проектирования радиопередатчиков различных назначений, диапазонов волн, мощностей, с амплитудной, однополосной и угловой модуляцией (включая цифровые виды модуляции). Приводятся примеры расчета: структурных схем передатчиков с элементами их оптимизации; радиочастотных каскадов усиления мощности на транзисторах и радиолампах; модуляционных устройств; синтезаторов частоты и автогенераторов.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Радиосвязь, радиовещание и телевидение». Книга может быть полезна студентам специальности «Радиотехника».

Учебное пособие для вузов.



К. т. н. З. СТЕВИЧ, д. т. н. М. РАЙЧИЧ-ВУЯСИНОВИЧ,  
д. т. н. З. СТОИЛЬКОВИЧ

Дата поступления в редакцию  
04.07 2003 г.

Югославия, г. Бор, Технический факультет; г. Белград, Электро-  
технический факультет  
E-mail: zstevic@ptt.yu

Оппоненты  
д. т. н. Й. РАДУНОВИЧ (Белградский университет),  
д. т. н. О. ГИЛЕНЕ (Ин-т химии, г. Вильнюс)

## УПРАВЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫМ РЕЖИМОМ В ГАЛЬВАНОТЕХНИКЕ

*Описана компьютерная система управления реверсным импульсным током в гальванотехнике. Приведено экспериментальное подтверждение эффективности системы.*

В гальванотехнике часто приходится решать сложные задачи, связанные с получением высококачественного покрытия (твердость, блеск, равномерность слоя, соблюдение острых граней, плотное прилегание к основе). Иногда эти условия просто невозможно выполнить в классическом режиме, основанном на применении постоянного тока [1, с.10; 2; 3, с. 193].

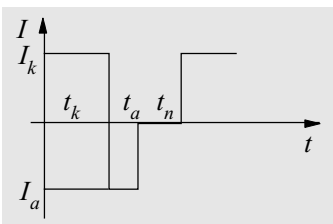


Рис. 1. Общий вид импульса тока

Как оказалось [4; 5, с. 186], эти проблемы вполне разрешимы при использовании импульсного режима. Вместо постоянного тока используют периодические импульсы, как показано на **рис. 1**, при этом среднее значение тока ( $I_{cp}$ ) равно или даже

немного больше его предельного значения ( $I_{пр}$ ) для данной гальванической системы:

$$I_{cp} = \frac{I_k t_k - I_a t_a}{t_k + t_a + t_n} \geq I_{пр},$$

где  $I_k$  — сила катодного тока;  
 $I_a$  — сила анодного тока;  
 $t_k$  — длительность катодного импульса;  
 $t_a$  — длительность анодного импульса;  
 $t_n$  — длительность паузы.

Коллектив авторов Технического факультета Белградского университета разработал систему управления импульсным током для лабораторных исследований гальванических импульсных режимов, которая базируется на персональном компьютере Pentium [6, с.120]. Аппаратная часть, кроме самого PC-компьютера, содержит также коммерческий AD-DA-конвертер и электронный интерфейс, разработанный и изготовленный авторами данной статьи. Программа для данной системы — аппликация, которая выполнена в LabView 6.1 [7]. Используемая программа позволяет регулировать силу тока в пределах 0—10 мА, а временные интервалы могут быть от нуля до бесконечности, что является большим преимуществом по

сравнению со стандартными решениями, применяемыми на сегодняшний день. Относительно малый диапазон силы тока можно легко увеличить с помощью обычного усилителя тока, что позволяет использовать эту систему управления процессом в промышленных целях.

На базе описанной системы проведен ряд экспериментов без использования специальных труднообезвреживаемых добавок. Эти эксперименты убедительно доказали возможность получения высококачественного покрытия.

Эксперименты проводились в электролите состава 0,3 моль/дм<sup>3</sup> CuSO<sub>4</sub>+0,5 моль/дм<sup>3</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> с импульсным током поляризации. В качестве вспомогательного электрода была использована ровная платиновая пластина площадью 2 см<sup>2</sup>. Выполнено осаждение меди как на ровной основе, так и на детали со сложной поверхностью. Образцы ровной формы подвергались тщательной очистке, а образцы сложной формы (ножки основания интегральных схем, винты и др.) обработаны лишь снятием маслянистого слоя и однократным полосканием, т. к. ранее уже были покрыты качественной противокоррозионной пленкой.

Поверхность покрытия наблюдали с помощью оптического микроскопа ЛОМО МИН-9 и фотографировали цифровой камерой (увеличение на всех микроснимках составляет 40 раз).

Толщина покрытия измерялась ультразвуковым цифровым прибором MITUTOYO DIGI-DERM 2100.

Из группы экспериментов с образцами ровной формы рассмотрим эксперимент, в котором основой является ровная пластинка меди размерами 3×5×0,5 мм.

В предполагаемом интервале предельного тока до 20 мА/см<sup>2</sup> была получена сила тока 6 мА и произведена поляризация постоянным током в течение одного часа. Затем на другом таком же образце применили импульсный режим, при этом средняя величина тока была также 6 мА. Длительность импульса составляла 14 с, а реверсия длилась 2 с. Процесс осаждения длительностью в 1 час осуществлялся 225 периодами, так что количество электричества (а значит, и ожидаемая толщина покрытия) было то же, что и в предыдущем эксперименте. Измеренная толщина покрытия в этих двух образцах составила 25 мкм.

На **рис. 2** изображены микроснимки пленок на ровной поверхности, полученные при воздействии постоянного тока и при использовании импульсного режима. При этом следует заметить, что поверхность образца **рис. 2, б** блестит больше и на ней

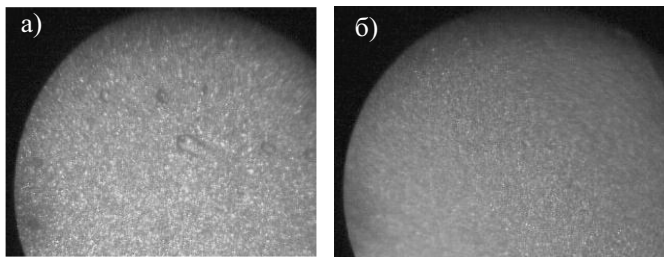


Рис. 2. Покрытие меди, полученное на ровной поверхности: а — при постоянном токе; б — при импульсном режиме

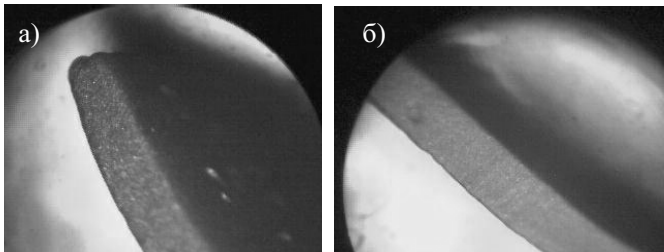


Рис. 3. Соблюдение граней:

а — при постоянном токе; б — при импульсном режиме

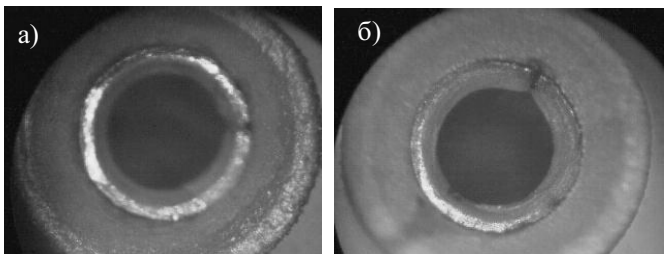


Рис. 4. Покрытие меди, полученное на сложной поверхности: а — при постоянном токе; б — при импульсном режиме

отсутствуют наросты (выпуклости), которые наблюдаются на образце рис. 2, а.

На рис. 3 представлены фотографии кромок тех же образцов, обработанных в двух режимах. При их сопоставлении отчетливо видны преимущества импульсного режима — на образце рис. 3, б намного четче прослеживаются острые кромки изделия.

Подобный эксперимент проводился и на образце сложной формы с целью проверки качества покрытия на этом типе основы. Площадь поверхности (30 мм<sup>2</sup>) и сила тока были те же, что и в эксперименте с образцом ровной формы. Длительность процесса осаждения в этих экспериментах, между тем, составляла 50 мин. Измеренная толщина покрытия составила 20 мкм.

На рис. 4 представлены микроснимки полученных покрытий, из которых видно, что пленка, полученная при импульсном режиме, гораздо лучшего качества.

### Выводы

Результаты экспериментов показали, что в импульсном режиме гальванического осаждения при оптимальном выборе параметров в электролитах без труднообезвреживаемых добавок могут быть получены пленки высокого качества.

Также были подтверждены широкие возможности предложенной авторами компьютерной системы с целью генерирования импульса поляризации.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Черненко В. И., Литовченко К. И., Папанова И. И. Прогрессивные и импульсные переменноточковые режимы электролиза.— Киев: Наукова думка, 1988.
2. Maksimović M. D. Pulsirajuća i reversna struja u galvanotehnici / YUCORR.— Vrnjačka Banja, april 2000.— Knjiga radova, s. 131.
3. Popov K. I., Maksimovich M. D. Theory of the effect of electrodeposition at a periodically changing rate on the morphology of metal deposits / In: Modern Aspects of Electrochemistry. Vol. XIX.— New York: Plenum Press, 1989.
4. Radović G. Poređenje prevlaka legure cink-nikal dobijenih konstantnom i pulsirajućom strujom / YUCORR.— Vrnjačka Banja, april 2000.— Knjiga radova, s. 154.
5. Костин Н. А., Кублановский В. С. Импульсный электролиз сплавов.— Киев: Наукова думка, 1996.
6. Minasi M. The complete PC upgrade & maintenance guide.— London: Sybex Publishing, 2001.
7. LabView — analysis concepts.— National Instruments, 2002.

### НОВЫЕ КНИГИ

#### НОВЫЕ КНИГИ

#### **Киселев А. З. ТЕОРИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕКТОРОВ РАССЕЙНИЯ ЦЕЛЕЙ.— М.: Радио и связь, 2002.— 272 с.**

Представлена теория радиолокационного обнаружения, основанная на использовании нового математического объекта — вектора рассеяния цели взамен фундаментальной характеристики — матрицы рассеяния цели. Эта замена привела практически к новой теории, изложенной применительно к наиболее актуальной проблеме — теории обнаружения целей на фоне пассивных помех (на фоне местных предметов, окружающих цель). Новая теория позволила решить задачи, актуальность которых осознавалась специалистами многие годы.

Общим итогом разработанной теории является создание математического аппарата, который позволяет главному конструктору рассчитать верхние границы надежности обнаружения целей или точности оценки их координат и оценить, насколько создаваемая им система далека от этих границ. В частности, новая теория, включающая поляриметрические характеристики целей, дает основу обнаружения не только движущихся объектов на фоне пересеченной (лесистой) местности, но и неподвижных (малоподвижных), что особенно актуально для современных радиолокаторов специального назначения.

Книга предназначена для специалистов, занимающихся исследованиями и разработками в области радиолокации, а также преподавателей вузов, аспирантов и студентов старших курсов с профилирующим образованием в области радиолокации.



К. ф.-м. н. Л. М. МОИСЕЕВ, к. ф.-м. н. В. В. КОВАЛЬЧУК

Украина, г. Одесса, Южно-Украинский гос. педагогический ун-т  
им. К. Д. Ушинского  
E-mail: wladik@tekom.odessa.ua

Дата поступления в редакцию  
21.03—25.07 2003 г.

Оппоненты к. т. н. Е. Я. БАДИНТЕР  
(НИИ SA "ELIRI", г. Кишинев),  
д. ф.-м. н. В. И. КОЛОМЫЩЕВ

(Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова, г. Киев)

## МЕХАНИЗМ РЕГУЛЯРНЫХ ФОРМОИЗМЕНЕНИЙ МИКРОПРОВОЛОКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТОКОВЫХ НАГРУЗОК

*Предложен механизм формирования микро-, макрорельефа и структуры калиброванного медного микропровода под воздействием импульсов электрического тока.*

Широкое промышленное применение микропроводов, изготовленных из меди и резистивных сплавов, требует подробного изучения их механических и электрических свойств, а также стабилизации этих свойств в различных эксплуатационных режимах. В особой мере это относится к режимам экстремальных электрических нагрузок.

Анализ результатов комплексного исследования формоизменения микропроводов, подвергнутых экстремальным электрическим нагрузкам [1], когда их цилиндрическая форма преобразуется в форму напизанных на нить бус, позволяет сделать некоторые выводы.

При условии плавления микропровода (вероятность чего показана в [1, с. 147]) величина магнитного давления вполне достаточна, чтобы изменить форму проводника. При этом возможна неравномерность электрических характеристик по длине, которая, естественно, приводит к неравномерному нагреву проволоки, неодновременному ее плавлению и, как следствие, к усилению неравномерности электрического сопротивления.

Следует, кроме того, отметить возможность совместного действия магнитных сил и сил поверхностного натяжения, что также может приводить к появлению капель расплавленного металла, переносу материала из прилегающих к ним участков и к уменьшению диаметра последних — образованию "перетяжек". Одновременно может происходить интенсивное окисление поверхности микропровода, приводящее к появлению чешуйчатого макрорельефа типа «птичьих следов». Последующее быстрое охлаждение расплавленных участков, а также рекристаллизация нерасплавленных, но сильно нагретых участков, вызывают укрупнение зерен (кристаллитов) материала.

Однако многочисленные теоретические и экспериментальные исследования [2—4] совершенно не в состоянии объяснить строгую (как правило) периодичность макрорельефа. Объяснить периодический перетяжечный рельеф микропровода действием магнитогидродинамической (МГД) неустойчивости

расплава [5, 6] или упругих сил [7, 8] также не представляется возможным. Во-первых, характерное время развития МГД-неустойчивости в шнуре диаметром 0,1 мм много меньше времени действия используемых импульсов тока [7] (т. е. разрушение микропровода должно произойти раньше окончания этого импульса). Во-вторых, длины волн упругих колебаний (а следовательно, и период стоячей волны), возбуждаемых импульсом 10 с, не могут быть столь малыми, как период перетяжечной структуры (соответствующая частота колебаний должна быть порядка 10 Гц).

В случае сильного взрыва, когда время нагрева жидкого металла и, соответственно, теплового расширения мало по сравнению со временем развития МГД-неустойчивости, возникают крайне высокие механические напряжения [2, 3]. В начальной стадии взрыва проволока, сильно нагреваясь, испытывает сильное аксиальное сжатие. То есть, согласно Эйлера, она должна принять волнообразно-синусоидальную форму с некоторой малой амплитудой, а в местах сильного сжатия должны происходить радиальные смещения масс, приводящие к ослаблению сжатия (причины динамического характера). Силы магнитного поля тока стремятся сжать проволоку в радиальном направлении (пинч-эффект) [9, 10]. Под действием этих сил в местах сужения массы будут смещаться внутрь, перпендикулярно оси проволоки, в то время как в местах расширения они будут выдавливаться в обратном направлении. Поскольку периодичность поперечного сечения вдоль длины проволоки возникает одновременно, то и сжатие узких участков начнется везде одновременно. Таким образом, возникает множество перегретых участков, из которых исходят интенсивные ударные волны.

В наших экспериментах синусоидальный импульс тока имел длительность 10 с, т. е. время нагрева жидкого металла достаточно велико по сравнению со временем развития МГД-неустойчивости в расплавленной проволоке [10]. Следовательно, в этом случае возможен слабый взрыв, и объяснить формоизменение и его периодичность при импульсном пропускании тока не представляется возможным. По-видимому, состояние микропровода, подвергнутой экстремальной электрической нагрузке, следует рассматривать как состояние неравновесной системы, которое может существенно отличаться от предписываемого законами равновесной термодинамики [11—13]. При этом, начиная с какой-то критической величины

возмущения, термодинамическая ветвь системы (в терминах [12]) становится неустойчивой и поведение системы характеризуется согласованным действием входящих в нее частиц [11—13]. Существенная неравновесность материала проволочек в условиях импульсного нагружения электрическим током позволяет привлечь к анализу их периодического формоизменения синергетические концепции [14—18]. Потеря термодинамической ветвью устойчивости сопровождается переходом микропровода в упорядоченное состояние (диссипативные структуры [19]). Описание поведения системы требует промежуточного (между микро- и макроуровнями) мезоскопического уровня организации объекта [20, 21], который определяется коллективными степенями свободы.

В настоящей работе предпринята попытка предложить механизм периодического формоизменения микропровода с привлечением синергетической концепции.

Рассмотрим одну из возможных причин образования перетяжек и их периодичности, основанную на силах Ампера, действующих на электрический ток со стороны магнитного поля, созданного самим этим током. Указанные силы создают давление на проводник с током, которое в случае круглого сечения направлено вдоль его радиуса. Для микропроводников диаметром 1 мм при токе  $I=100$  А это давление, как было показано в [1], имеет величину порядка  $10^5$  Па. Такого давления оказывается вполне достаточно, чтобы обеспечить наблюдаемое изменение поперечного сечения в месте перетяжки, если микропроводник нагреть до температуры плавления, когда упругие модули обращаются в нуль.

Вполне возможно, что, в действительности, температура плавления достигается только в отдельных местах микропровода, где и образуются перетяжки. Причиной такого неоднородного разогрева, вероятнее всего, является неоднородность электросопротивления по длине микропровода, которая при пропускании электрического тока приводит к неустойчивости разогрева микропровода. Действительно, на участке микропровода, обладающем большим электросопротивлением, выделяется большее количество джоулева тепла, в результате чего он нагревается до большей температуры по сравнению с участками, обладающими меньшим электросопротивлением. Но поскольку электросопротивление металлов растет с увеличением температуры, то растет и неоднородность электросопротивления по длине микропровода, а вместе с ней — и неоднородность его разогрева.

Проведем оценки температурного градиента, обусловленного градиентом электрического сопротивления вдоль всей длины микропровода.

Пусть  $r_0(x, t)$  — удельное (приходящееся на единицу длины) сопротивление микропровода в точке  $x$  в момент времени  $t$ . Тогда полное сопротивление исследуемого отрезка микропровода

$$R(t) = \int_L r(x, t) dx. \quad (1)$$

Температурная зависимость  $r(x, t)$  определяется выражением

$$r(x, t) = r_0(x)(1 + \alpha T(x, t)), \quad (2)$$

где  $T(x, t)$  — температура микропровода в точке  $x$  в момент времени  $t$ , °C;

$\alpha$  — температурный коэффициент электросопротивления, 1/°C;

$r_0(x)$  — удельное (линейное) сопротивление микропровода при 0°C, Ом/м.

Дифференцируя уравнение (2) по времени и считая, что  $\alpha$  не зависит от температуры, получим дифференциальное уравнение вида

$$\frac{dr(x, t)}{dt} = r_0(x) \alpha \frac{dT}{dt}. \quad (3)$$

Джоулево тепло, которое выделяется при прохождении тока  $I(t)$  по микропроводу единичной длины за время  $dt$ , равно

$$dQ = I^2(t) r(x, t) dt = mc dT, \quad (4)$$

где  $I(t)$  — действующее значение силы тока;

$m$  — масса отрезка микропровода единичной длины;

$c$  — удельная теплоемкость материала, из которого изготовлен микропровод (допускаем, что она не зависит от температуры).

С учетом соотношения (4) уравнение (3) приобретает вид

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mc} I^2(t) r(x, t) = \frac{1}{mc} \frac{U^2}{R(t)} r(x, t), \quad (5)$$

где  $U$  — действующее значение напряжения, приложенного к проводнику (будем считать его стабилизированным, т. е. не зависимым от времени).

Принимая во внимание формулу (5), дифференциальное уравнение (3) запишем в виде

$$\frac{dr(x, t)}{dt} = \alpha r_0(x) \frac{dT}{dt} = \frac{\alpha}{mc} \frac{U^2}{R^2(t)} r(x, t) r_0(x). \quad (6)$$

Интегрируя (6) по переменной  $x$  и учитывая (1), получим:

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{\alpha}{mc} \frac{U^2}{R^2(t)} \int_L r_0(x) r(x, t) dx = \frac{\alpha}{mc} \frac{U^2}{R(t)} \bar{r}_0(t), \quad (7)$$

где введено обозначение

$$\bar{r}_0(t) = \frac{\int_L r_0(x) r(x, t) dx}{\int_L r(x, t) dx} = \frac{\int_L r_0(x) r(x, t) dx}{R(t)} \quad (8)$$

и  $L$  — величина, определяющая характерное расстояние между перетяжками.

Заметим, если  $r_0(x)$  слабо зависит от  $x$ , то  $\bar{r}_0(t) \approx r_0$  (усредненное линейное удельное сопротивление микропровода).

Из выражения (7) имеем:

$$R(t) dR(t) = \frac{\alpha}{mc} \bar{r}_0 U^2 dt$$

или

$$dR^2(t) = 2 \frac{\alpha}{mc} \bar{r}_0 U^2 dt. \quad (9)$$

Проинтегрировав обе части уравнения (9), получим:

$$R^2(t) = 2 \frac{\alpha}{mc} U^2 \bar{r}_0 t + R^2(0), \quad (10)$$

где  $R(0)$  — начальное значение сопротивления микропровода.

Подставив (10) в (6), получим уравнение для  $r(x, t)$

$$\frac{d}{dt} r(x, t) = \frac{\alpha U^2 r_0(x) / mc}{2\alpha U^2 \bar{r}_0 t / mc + R^2(0)} r(x, t),$$

которое легко приводится к виду

$$\frac{dr(x, t)}{r(x, t)} = \frac{1}{2} \frac{r_0(x) / \bar{r}_0}{t + t_0} dt, \quad (11)$$

где введено обозначение:

$$t_0 = \frac{R^2(0)}{2\alpha U^2 \bar{r}_0 / mc}. \quad (12)$$

Интегрирование уравнения (11) в предположении, что  $\bar{r}_0$  не зависит от времени, приводит к выражению

$$\ln r(x, t) = \frac{1}{2} \frac{r_0(x)}{\bar{r}_0} \ln(t + t_0) + C. \quad (13)$$

Константу интегрирования  $C$  находим из начальных условий:

$$r(t, x) = r_0(x) \text{ при } t=0,$$

т. е.

$$C = -\frac{1}{2} \frac{r_0(x)}{\bar{r}_0} \ln t_0 + \ln r_0(x).$$

После элементарных преобразований перепишем соотношение (13):

$$r(x, t) = r_0(x) \left( \frac{t + t_0}{t_0} \right)^{r_0(x) / 2\bar{r}_0}. \quad (14)$$

С учетом (12), величину  $((t+t_0)/t_0)^{1/2}$  можно записать в таком виде:

$$((t + t_0) / t_0)^{1/2} = \left( \frac{2\alpha U^2 \bar{r}_0 t / mc + R^2(0)}{R^2(0)} \right)^{1/2}. \quad (15)$$

Или, учитывая соотношение (10), получим:

$$((t+t_0)/t_0)^{1/2} = R(t)/R(0). \quad (16)$$

Подстановка (16) в (14) дает искомый закон изменения:

$$r(x, t) = r_0(x) \left( \frac{R(t)}{R(0)} \right)^{r_0(x) / \bar{r}_0}. \quad (17)$$

Применяя формулу (2), получим:

$$\alpha T(x, t) = r(x, t) / r_0(x) - 1 \quad (18)$$

или

$$\alpha \Delta T(x, t) = r(x, t) / r_0(x) - r(x', t) / r_0(x'). \quad (19)$$

Подставим  $r(x, t) / r_0(x)$  из (17) в формулу (13). Как результат получим:

$$\begin{aligned} \alpha \Delta T(x, t) &= (R(t) / R(0))^{r_0(x) / \bar{r}_0} - (R(t) / R(0))^{r_0(x') / \bar{r}_0} = \\ &= (R(t) / R(0))^{r_0(x) / \bar{r}_0} \cdot \left[ 1 - (R(t) / R(0))^{(r_0(x') - r_0(x)) / \bar{r}_0} \right] = \\ &= (R(t) / R(0))^{r_0(x) / \bar{r}_0} \cdot \left[ 1 - (R(t) / R(0))^{\Delta r_0(x) / \bar{r}_0} \right]. \quad (20) \end{aligned}$$

Учитывая, что  $\Delta r_0(x) / \bar{r}_0 = \Delta r_0(x) / r_0 \ll 1$  (физически это означает, что неоднородность электрического сопротивления вдоль всей длины отрезка микропровода невелика), и, разложив выражение в квадратных скобках (20) в ряд, получим:

$$\alpha \Delta T(x, t) = (R(t) / R(0)) \cdot \ln(R(t) / R(0))^{\Delta r_0(x) / \bar{r}_0}. \quad (21)$$

Из соотношения (2) имеем (при температуре плавления  $T_{\text{пл}}$ ):

$$\int r(x, t) dx = \int r_0(x) (1 + \alpha T(x, t)) dx \approx R(0) (1 + \alpha T_{\text{пл}})$$

или

$$R(t) = R(0) (1 + \alpha T_{\text{пл}}). \quad (22)$$

Тогда из (21) получим:

$$\Delta T(x, t) / \Delta r_0 = ((1 + \alpha T_{\text{пл}}) \cdot \ln(1 + \alpha T_{\text{пл}})) / \alpha r_0. \quad (23)$$

Если провод медный, то  $\alpha = 1/273,15^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $T_{\text{пл}} = 1083^\circ\text{C}$ . В этом случае

$$\ln(1 + \alpha T_{\text{пл}}) \approx 1;$$

$$1 + \alpha T_{\text{пл}} \approx \alpha T_{\text{пл}}. \quad (24)$$

Выражение (23) можно записать в более простом виде:

$$(\Delta T / T_{\text{пл}}) \approx \Delta r_0 / \bar{r}_0. \quad (25)$$

То есть разность температур ( $\Delta T$ ) двух участков микропровода при его импульсном нагреве до температуры плавления ( $T_{\text{пл}}$ ) связана с разностью их удельных линейных электросопротивлений ( $\Delta r$ ) простым соотношением (25), где  $\bar{r}_0$  — среднее значение электросопротивления при комнатной температуре.

Поскольку для меди  $T_{\text{пл}} \approx 1000^\circ\text{C}$ , то при  $\Delta r / \bar{r}_0 \approx 0,01$  величина  $\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$ , а этого вполне достаточно, чтобы вызвать неоднородность модулей упругости, достаточную для образования перетяжек.

Указанное соотношение получено без учета процессов теплопроводности, приводящих к выравниванию температур различных участков микропровода. (Благодаря этим процессам неоднородный разогрев микропровода становится возможным лишь в том случае, когда соответствующие участки микропровода разнесены достаточно далеко.)

Таким образом, неоднородный разогрев микропровода может быть обеспечен только за счет таких достаточно крупномасштабных неоднородностей электросопротивления, характерные размеры которых превышают некоторую критическую величину  $l_0$ .

Далее проведем количественные оценки периодичности микрорельефа микропровода после пропуска по нему импульсов электрического тока.

Возникновение градиента температуры, который определяется выражением (25), вызывает тепловой поток, стремящийся выровнять температуру. Этот поток определяется уравнением теплопроводности:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (26)$$

где  $q$  — плотность теплового потока;  
 $\lambda$  — коэффициент теплопроводности.

Нагрев, вызываемый потоком  $q$ , определяется соотношением

$$Q = cm\Delta T = q\Delta tS; \quad (27)$$

$$m = dV = dls, \quad (28)$$

где  $d$  — плотность вещества (материала) микропровода;  
 $l$  — длина элемента микропровода, на котором возникает перепад  $\Delta T$  за время  $\Delta t$ ;  
 $S$  — площадь поперечного сечения микропровода.

Подставляя (27) и (28) в (26) с учетом

$$\frac{dT}{dx} \approx \frac{\Delta T}{l},$$

получим:

$$cdls\Delta T / (S\Delta t) = \lambda \frac{\Delta T}{l}.$$

Отсюда:

$$l = \sqrt{\lambda \Delta t / (cd)}. \quad (29)$$

В условиях равновесного температурного градиента тепловой поток уравнивается неоднородностями выделения джоулева тепла:

$$Q = Q_{дж}. \quad (30)$$

Из (27) и (28) следует:

$$Q = cm\Delta T = cdlS\Delta T, \quad (31)$$

а  $Q_{дж}$  возьмем из выражения (4):

$$Q_{дж} = I^2 \Delta r \Delta t. \quad (32)$$

Из выражений (30) и (32) получим:

$$\Delta t = \frac{cdls}{I^2} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta r}, \quad (33)$$

а из (2) имеем:

$$\Delta r = \Delta r_0 (1 + \alpha T_{пл}) \approx \Delta r_0 \alpha T_{пл}. \quad (34)$$

Из соотношений (25) и (34) вытекает:

$$\frac{\Delta T}{\Delta r} = \frac{\Delta T}{\Delta r_0 \alpha T_{пл}} = \frac{T_{пл}}{r_0 \alpha T_{пл}} = \frac{1}{\alpha r_0}, \quad (35)$$

где

$$r_0 = \rho \frac{l}{S}; \quad (36)$$

$\rho$  — удельное сопротивление.

Учитывая (33), (35) и (36), имеем:

$$\Delta t = \frac{cdlsS}{I^2 \alpha \rho l} = \frac{cdS^2}{I^2 \alpha \rho}. \quad (37)$$

Действующее значение тока при температуре, близкой к  $T_{пл}$ ,

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R(0)\alpha T_{пл}} = \frac{I_0}{\alpha T_{пл}}. \quad (38)$$

Подстановка (37) в (29), с учетом (38), дает:

$$l = \sqrt{\frac{\lambda S^2}{I^2 \alpha \rho}} = \sqrt{\frac{\lambda}{\alpha \rho}} \cdot \frac{S \alpha T_{пл}}{I_0}. \quad (39)$$

Для меди [23, с. 27]:

$\lambda = 0,920$  кал/(см·с·°C) = 386 Вт/(м·°C);  
 $S = 0,5 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup> (что соответствует проводу диаметром 80 мкм);  
 $I_0 = 100$  А;  
 $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;  
 $\alpha = 1/273,15$  °C<sup>-1</sup>;  
 $T_{пл} = 1083$  °C.

Тогда

$$l = \sqrt{\frac{386}{273,15 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8}}} \cdot \frac{0,5 \cdot 10^{-8} \cdot 1086}{100} \approx 0,493 \text{ мм}, \quad (40)$$

что коррелирует с экспериментальными значениями  $L = 0,8$  мм.

Количественное согласие рассчитанных и измеренных значений  $L$  указывает на то, что предложенный нами механизм образования перетяжек микропроводов при пропускании через них импульсов электрического тока является определяющим.

\*\*\*

Полученные экспериментальные данные [1, с. 139] и предложенный нами механизм формоизменения позволяют считать состояние микропровода, при котором она приобретает регулярное формоизменение, соответствующим определенному (мезоскопическому) структурному уровню [20, 21], а механическое воздействие на микропроводку, возникающее в результате импульсной электрической нагрузки, реализуется в волнообразный деформационный рельеф [1], являющийся итоговой аккомодацией формы металлического цилиндра. По крайней мере, из приведенных расчетов следует, что электрический импульс тока эквивалентен термодинамическому массопереносу, выражающемуся в периодических перемещениях металла из узких мест (перетяжек) в утолщающиеся.

И еще. Анализ полученных результатов позволяет предложить способ контроля физических свойств микропроводов после их термической обработки, который может быть полезен при оценке эксплуатационных характеристик проволок и микропроводов из черных, цветных, драгоценных металлов и сплавов, а также при решении проблемы устойчивости микропроводов к экстремальным токовым нагрузкам.

Действительно, известен способ контроля остаточных внутренних напряжений в проволоке [22], заключающийся в пропускании через проволоку импульсов электрического тока с плотностью, численно равной такой величине, которая вызывает появление периодических формоизменений (перетяжек) по длине проводника. Частота расположения перетяжек на контролируемом образце дает информацию об изменении геометрических размеров проволоки.

С целью расширения информативности контроля за счет оценки распределения неоднородностей электросопротивления по длине проволоки предварительно натягивают в пределах, позволяющих реализовать ресурс упругости, и измеряют расстояние между перетяжками  $L$ , которое связано с размером неоднородностей электросопротивления  $l$  соотношением  $l = 0,5L$ , а критическое значение неоднородностей электросопротивления  $l_0$ , обуславливающее неоднородный разогрев микропровода и, тем самым, неоднородность упругих модулей, вызывающую образование периодических формоизменений, рассчитывают по формуле (39).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Моисеев Л. М. Регулярные формоизменения деформируемого твердого тела.— Одесса: ХОРС, 1995.
2. Доровский В. Н., Искольдский А. М., Роменский Э. И. Динамика импульсного нагрева металла током и электрический взрыв проводников: Препринт, 174.— Новосибирск: ИВТАН, 1982.
3. Воробьев В. С., Рахель А. Д. Численное моделирование некоторых режимов электрического взрыва алюминиевых проволок: Препринт № 2-261.— М.: ИВТАН, 1989.
4. Громов В. Е., Гуревич Л. И. Влияние токовых импульсов на подвижность дислокаций Zn при 77 К//Изв. вузов. Сер. Физика.— 1990.— Т. 33, № 3.— С. 35—39.
5. Абрамова К. Б., Златин А. А., Прегуд Б. П. Магнито-гидродинамические неустойчивости жидких и твердых полупроводников. Разрушение проводников электрическим током // ЖЭТФ.— 1975.— Т. 69, вып. 6/12.— С. 2007—2022.
6. Абрамова К. Б., Валицкий В. П., Кандауров Ю. В. и др. Магнито-гидродинамические неустойчивости при электрическом взрыве // ДАН СССР.— 1966.— Т. 167, № 4.— С. 776—781.
7. Долбин Н. И. Распределение упругих волн в токопроводящем стержне // ПМТФ.— 1962.— № 2.— С. 104—109.
8. Долбин Н. И., Морозов А. И. Упругие изгибные колебания стержня с электрическим током // ПМТФ.— 1966.— № 3.— С. 97—103.
9. Спицын В. И., Троицкий О. А. Моделирование теплового и пинч-действия импульсного тока на пластическую деформацию металла // ДАН СССР.— 1975.— Т. 220, № 5.— С. 1070—1073.
10. Байков А. П., Шестак А. Ф. О характере плавления металлических проводников при импульсном нагреве // Письма в ЖТФ.— 1979.— Т. 5, вып. 22.— С. 1355—1358.
11. Пригожин И. Р. Введение в неравновесную термодинамику.— М.: Мир, 1960.
12. Пригожин И. Р. Неравновесная статистическая механика.— М.: Мир, 1964.
13. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах.— М.: Мир, 1979.
14. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах.— М.: Мир, 1979.
15. Хакен Г. Синергетика.— М.: Мир, 1980; Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах.— М.: Мир, 1985.
16. Олемской А. И., Наумов И. И. Синергетика и усталостное разрушение металлов.— М.: Наука, 1989.
17. Синергетика и усталостное разрушение металлов / Под ред. В. С. Ивановой.— М.: Наука, 1989.
18. Баланкин А. С. Синергетика деформируемого тела.— М.: Наука, 1991.
19. Родионов В. Н. Диссипативные структуры в геомеханике // Успехи механики.— 1979.— Т. 4, № 2.— С. 97—111.
20. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел.— Новосибирск: Наука, 1985.
21. Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Данилов В. И. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения.— Новосибирск: Наука, 1990.
22. А. с. 1073669 СССР, МКИ G 01 N 27/ 00. Способ контроля остаточных внутренних напряжений в проволоке / А. Д. Набок.— Опубл. 15.02. 84. Бюл. № 6.
23. Справочник химика.— Л.: Химия, 1975.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Свердлова И. С. (под ред.) КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ В ОЧЕРКАХ И ВОСПОМИНАНИЯХ.— М.: Радио и связь, 2002.— 656 с.**

Книга представляет собой сборник очерков и воспоминаний о развитии и совершенствовании в СССР и России кабельных симметричных, коаксиальных, оптических магистральных, внутризонавых, городских линий связи и охватывает период с 1945 года до наших дней. В свободном стиле освещается: производство кабелей в нашей стране, их особенности, характеристика линий, кабельные аксессуары, системы передачи, организованные на кабельных линиях, методы защиты от электромагнитных влияний, ударов молнии, коррозии, механических повреждений, комплекс вопросов проектирования, строительства, эксплуатации линий, управления сетью связи. Отдельная глава посвящена кабельным линиям связи на железнодорожном транспорте.

Книга написана в основном ветеранами отрасли, участниками описываемых событий. Воспоминания чередуются с техническими описаниями, официальными данными, лирическими отступлениями. В сборнике собран громадный материал о жизни отрасли «Связь», а попутно и страны с ее огромной территорией и многочисленными перенесенными тяготами. Упомянуты сотни специалистов — руководителей, рядовых инженеров, спайщиков, водителей, вершивших историю отечественной электросвязи. Книга иллюстрирована уникальными, в большинстве своем нигде ранее не публиковавшимися, фотографиями.

Сборник посвящен кадровым работникам связи. Однако он, безусловно, будет интересен молодежи, специалистам связи, смежных отраслей, всем, кто выбирает свой путь в море современных телекоммуникаций.



## НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ НАПРАВЛЕНИИ

К 55-летию ОАО «Авангард» (г. С.-Петербург)

Ни одно из развивающихся в 20-м веке научно-технических направлений не оказало столь эффективного влияния на прогресс человеческого общества, как электроника. На сегодняшний день благодаря радиоэлектронике успешно развиваются фактически все области науки, техники и производства. Она широко внедрилась в быт и космические исследования, в сельское хозяйство, военное дело, в индустрию развлечений и научные исследования, в медицину и процесс обучения.

Восстановление и развитие народного хозяйства СССР в первые послевоенные годы включало широкий фронт работ в области производства радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). В первую очередь, это касалось создания радиолокационных систем (РЛС), значимость которых для Вооруженных Сил была предельно очевидна.

Еще в июле 1943 г. вышло постановление Госкомитета обороны «О создании Совета по радиолокации при ГКО». В 1946–1948 гг. были созданы станция СНАР-1, работающая в сантиметровом диапазоне, корабельная РЛС «Риф», РЛС «Гнейс-5М». Но одновременно с резким возрастанием значимости РЭА в деле обеспечения обороноспособности государства громадные задачи перед разработчиками и изготовителями аппаратуры выдвинуло и становление производства изделий гражданского назначения: телевизоров, радиоприемников, радиол и т. д. Заводы оказались под угрозой лавины документации на производство новых изделий, зачастую практически без технологических рекомендаций, с использованием материалов и комплектующих изделий, подчас случайно попадавших разработчикам под руку.

В такой обстановке в 1948 г. вышло постановление СМ СССР об образовании научно-исследовательского технологического института НИТИ-18 в составе 4-го ГУ Министерства авиационной промышленности. Таким образом, «Авангард» ведет свою историю с

20 октября 1948 года, когда и был зарегистрирован НИТИ-18.

Правительством страны была определена основная цель создания НИТИ-18 — формирование центра прогрессивных технологических процессов и технологического оснащения серийного производства электрорадиоэлементов, а также создания передовых методов проектирования радиоэлектронной аппаратуры.

Первым директором НИТИ-18 был назначен Иван Васильевич Федин, который еще до образования института был директором одного из ленинградских заводов, эвакуированных во время войны. Первым главным инженером был Михаил Федорович Поликарпов, вскоре ставший директором.

С первых дней существования институт обеспечивал создание серийной технологии производства различных авиационных радиолокационных станций. В этот период была разработана широкая гамма технологической оснастки, проведена конструкторско-технологическая отработка элементной базы РЛС, созданы необходимые производственные мощности, разработаны и внедрены оригинальные технологии, что в итоге обеспечило стране заданный уровень оснащения авиации современной РЭА.

Под руководством опытных, авторитетных в промышленности специалистов формировались бригады из технологов, конструкторов, радистов, большей частью совсем молодых. Бригады прорабатывали непосредственно на заводах документацию, вводили первоочередные дополнения, поправки, развертывали пооперационно технологию.

Для принятия обоснованных решений нужна была собственная техническая и экспериментальная база. Отчасти использовались возможности ленинградских заводов. Так, для ряда задач, касающихся изготовления первого в стране самолетного панорамного радиолокатора на одном из ле-

нинградских заводов, использовались возможности самого завода.

Результативная деятельность экспериментальной базы обеспечивалась соответствующими инженерными службами. В первые годы существования института были образованы такие базовые отделы как:

- конструкторско-технологической отработки электрорадиоизделий элементной базы РЛС;
- конструктивно-технологической отработки средств радиолокации;
- разработки контрольно-измерительной аппаратуры;
- разработки технологических процессов на новых физико-химических принципах.

Имея собственный наработанный багаж, достаточно обширный опыт его апробации на заводах, институт смог существенно влиять на состояние серийной технологии производства авиационных РЛС и, одновременно, утверждать свой авторитет по всем технологическим проблемам, возникающим на предприятиях, производящих РЭА. Многие годы в планах института непрямым разделом было оказание технической помощи предприятиям в производстве изделий.

С 1950 года институт приступил к целенаправленной разработке технологии монтажных работ. Также были активизированы разработки контрольно-измерительной аппаратуры.

В 1952–1953 гг. институт организовал и возглавил в масштабах СССР разработку и внедрение на заводах технологии печатного монтажа.

В конце 1950-х годов получили активное развитие работы по унификации конструкций узлов и блоков РЭА, а также было сформировано направление проектирования и производства РЭА на базе функционально-узловой метода. Унификация конструкций РЭА на основе рядов унифицированных функциональных узлов (УФУ) в сочетании с печатным монтажом со-

здали реальные предпосылки для широкой механизации и резкого увеличения производства РЭА.

Создание рядов УФУ является важной вехой в истории ОАО «Авангард», т. к. это был первый шаг к организации широкой отраслевой и межотраслевой унификации радиоэлектронной аппаратуры.

В 1960-х годах по постановлению правительства в институте было создано Особое конструкторско-технологическое бюро (ОКТБ) для оказания помощи ленинградским предприятиям в освоении изделий гражданского назначения с созданием соответствующих конвейерных линий. Работая с ленинградскими заводами, институт не ослаблял внимания к опеке новых изделий на предприятиях страны. Именно в это время проводилась работа с КБ-1 по разработке серийной технологии изготовления микромодулей этажерочного типа, включавшая поиск и создание необходимых материалов, создание комплекса оборудования, контрольно-измерительной аппаратуры, а также внедрение в серийное производство.

В 1965 году НИТИ-18 был передан в ведение Госкомитета по радиоэлектронике и получил наименование ЛНИТИ — Ленинградский научно-исследовательский технологический институт.

В ЛНИТИ были разработаны и широко внедрены на предприятиях страны технология и оборудование для производства односторонних и двухсторонних печатных плат, технология и оборудование для механизации формирования гальванических покрытий, технология герметизации радиоэлементов компаундами. Коллектив института работал над технологией и оборудованием для изготовления витых и ленточных сердечников, над оборудованием для намотки тороидальных малогабаритных трансформаторов, над технологией и оснащением для подготовки элементов к монтажу, над флюсами для пайки и др.

В эти годы было положено начало развитию новых методов конструирования и технологии изготовления РЭА на основе комплексной миниатюризации, которая обеспечивала перевод на микроэлектронные принципы построения все без исключения блоки и устройства аппаратуры. В 1960–1970-х годах комплексная миниатюризация РЭА была одной из важнейших государственных задач, и «Авангард» являлся одним из

ведущих институтов, который определял техническую политику в этой области.

На базе предприятия разрабатывались конструкции, технологии и оборудование для производства изделий специальной микроэлектроники, были созданы сотни наименований микросборок и организовано их производство для систем обеспечения боевой авиации, ракетных комплексов и систем управления.

Параллельно бурно развивалась научно-техническая и технологическая база микроэлектроники и печатных плат, были построены два завода для серийного производства микросборок, а также технологического оборудования для оснащения предприятий отрасли.

В 1973 г. на базе ЛНИТИ было организовано научно-производственное объединение «Авангард» в составе ЛНИТИ, опытного завода «Импульс», серийного завода «Компонент», СКТБ «Труд», ЛГПТИ, Киевского, Ленинанканского, Одесского, Ташкентского филиалов.

В 1987 году на базе ЛНПО «Авангард» был образован один из первых в стране Межотраслевой научно-технический комплекс (МНТК) «Радиотехномаш», объединявший 51 предприятие 17 отраслей СССР.

На основе разработок, проводимых ЛНПО «Авангард» совместно с ведущими предприятиями различных отраслей промышленности, была создана система межотраслевых базовых несущих конструкций (МБНК), которая обеспечивает конструктивную основу для шкафов, пультов, приборов, блочных каркасов и ячеек наземной стационарной, возимой на колесных и гусеничных шасси, а также морской РЭА, удовлетворяющей требованиям эксплуатации военных стандартов и международных стандартов МЭК.

Специалисты НПО организовали разработку программ переоснащения отрасли современным автоматизированным технологическим оборудованием. Разработаны более сотни наименований, изготовлены и внедрены тысячи единиц оснащения, более 200 отраслевых и государственных стандартов. Под руководством ЛНПО «Авангард» были построены пять заводов, десятки цехов и сотни участков по производству изделий специальной микроэлектроники.

В 1993 г. в соответствии с государственной программой прива-

тизации ЛНИТИ был преобразован в акционерное общество «Авангард». Наступил совершенно новый этап в жизни коллектива.

В новых условиях, когда требуется разработка продукции, имеющей спрос на отечественном и зарубежном рынке и, самое главное, конкурентоспособные характеристики, ОАО «Авангард» удалось не только сохранить свой научно-технологический потенциал, но и существенно его развить.

На сегодняшний день разработана технология производства полупроводниковых газовых сенсоров, сенсоров давления воздуха в шинах автомобилей и крутящего момента на основе пьезокварцевых резисторов, сенсоров измерения уровня криогенных жидкостей с использованием кремниевых мембран и полиимидных пленок. В развитие технологии производства специализированных изделий микроэлектроники создана гамма устройств на поверхностных и объемных акустических волнах с характеристиками, не уступающими зарубежным аналогам.

Предприятие выполняет большой объем международных контрактов с ведущими фирмами США, Германии, Англии и КНР.

В последние годы обеспечивается частичное переоснащение производства. В частности, создана новая установка микроволнового ионно-химического травления для формирования микромеханических структур и уникальный аналитический комплекс для высокоточной калибровки и аттестации газовых сенсоров и приборов.

Знаменательным стало решение провести кардинальное технологическое перевооружение и реконструкцию производства. Для этого было приобретено высокопроизводительное автоматизированное оборудование японской фирмы Amada: координатно-револьверный пресс с ЧПУ, листогибочный пресс с ЧПУ и гильотинные ножницы с гидравлическим приводом. Это позволило увеличить мощности и технологические возможности производства, повысить качество, снизить трудоемкость изготовления, поднять профессиональный уровень технического персонала предприятия и внедрить прогрессивные технологии в производство базовых несущих конструкций.

ОАО «Авангард» успешно развивается и идет вперед. В 2001 г. ОАО «Авангард» заключило твор-

ческий договор с Государственным университетом авиационного приборостроения. По этому договору реализуется организационное, методическое и материальное обеспечение актуальных научно-технических и учебных проектов и программ. Студенты ГУАП прохо-

дят технологическую и преддипломную практику и в дальнейшем приходят работать на предприятие.

Сегодня ОАО «Авангард» — авторитетное и конкурентоспособное предприятие, достойно продолжающее роль головного технологического предприятия страны в об-

ласти радиоэлектроники. Коллектив может с гордостью встречать свой юбилей.

*Д. т. н. В. А. Шубарев,  
генеральный директор  
научно-производственного  
предприятия «Авангард»*

## ИЗДАТЕЛЬСТВУ «РАДИО И СВЯЗЬ» 85 ЛЕТ

Научно-техническое издательство «Радио и связь» ведет отсчет своей истории с момента создания редакционно-издательской части и бюро печати в составе Наркомата почт и телеграфов 30 ноября 1918 г.

Название и структура издательства несколько раз менялись («Связьтехиздат», «Связьрадиоиздат», издательство «Связь»), но неизменной оставалась главная задача — выпуск производственных, справочных, научных и учебных изданий, обобщающих технические решения отечественных и зарубежных специалистов в области связи, способствующих профессиональной подготовке работников отрасли, повышению качества работы предприятий связи.

В двадцатые годы издательством были выпущены в свет книги, имевшие большое значение для развития техники и сетей связи: «Незатухающие колебания и их применение в беспроводной телеграфии и телефонии» Ю. Н. Меньшикова (1922 г.), «Электрический телеграф» Н. А. Яблонского (1923 г.), «Автоматическая телефония» В. А. Сергиевского (1928 г.).

В 1929 г. издательство совместно с Всесоюзным обществом друзей радио начало выпускать радиобиблиотеку «Копейка» под редакцией Я. В. Мукомля — популярное массовое издание по радиотехнике.

В начале тридцатых годов была издана монография Б. А. Введенского и А. Г. Аренберга «Распространение ультракоротких волн», ставшая основополагающей в этой области радиотехники — техники сверхвысоких частот, на которой в дальнейшем стали базироваться телевидение, радиолокация, радиорелейная связь. В 1935 г. впервые в мировой технической литературе появилась обобщающая моногра-

фия «Дециметровые волны» В. И. Калинина. В эти годы увидели свет фундаментальные учебники («Дальняя связь», «Теория связи по проводам», «Радиовещание» и др.), по которым училось не одно поколение отечественных специалистов.

За самоотверженный труд в обеспечении страны средствами связи в числе связистов были удостоены правительственных наград в 1943 г. и ряд работников «Связьиздата».

В послевоенные годы, по мере развития отрасли, расширения научно-технических исследований в области связи, радиотехники, электроники, рос выпуск литературы, посвященной теоретическим и практическим вопросам проектирования, создания, эксплуатации новых систем, аппаратуры и оборудования. В эти годы в свет вышли книги В. А. Котельникова, А. А. Пистолькорса, И. С. Гоноровского, В. Ф. Власова и др., труды которых впоследствии были отмечены государственными премиями и наградами.

В 1981 г. произошло объединение издательств «Связь» и «Советское радио» под новым названием — «Радио и связь».

«Советское радио» начало свою деятельность в 1946 г. как подразделение при Бюро новой техники Министерства обороны. У его истоков стоял академик А. И. Берг. Первоначальной задачей этого подразделения было выпустить в свет перевод знаменитой «массачусетской серии» книг по радиолокации. Позднее профилем деятельности «Советского радио» становятся книги по различным аспектам радиоэлектроники и смежным техническим дисциплинам. Здесь впервые в стране издаются книги по исследованию операций, кибернетике, системной технике, системному анализу, искусственному интеллекту.

В издательстве «Советское радио» на русский язык были переведены книги Н. Винера «Кибернетика» (1958 г.), К. Ланкастера «Математическая экономика» (1968 г.), Т. Саати «Элементы теории массового обслуживания и ее приложения» (1971 г.) и т. д. Среди авторов издательства — видные отечественные ученые: А. Берг, Г. Поспелов, Е. Вентцель, Д. Юдин, М. Ботвинник, Н. Бусленко, Д. Конторов, И. Яглом и др.

После 1981 г. в издательстве «Радио и связь» сосредоточено издание серии «Массовая радиобиблиотека», основанной в 1947 г. и пользующейся заслуженной популярностью среди радиолюбителей страны. В настоящее время вышло в свет уже более 1200 выпусков этой серии.

Среди книг, увидевших свет в последние годы, следует отметить монографии отечественных ученых и специалистов «Теория дифракции», «Оптоэлектронные элементы и устройства», «Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи», «Сверхширокополосные микроволновые устройства»; фундаментальные переводные монографии «Цифровая связь» и «Беспроводная цифровая связь»; сборники «100 лет радио» и «Кабельные линии связи»; учебники «Радиопередающие устройства», «Радиоприемные устройства», «Электродинамика», «Теория электрических цепей», «Теория электрической связи», «Всеобщее управление качеством», «Телевидение», «Случайные процессы в радиотехнике», «Электронные квантовые приборы и микрозлектроника».

В настоящее время издательство является Федеральным государственным унитарным предприятием, находящимся в подчинении у Российского агентства по системам управления.

# Научно-технический журнал «Известия высших учебных заведений. ЭЛЕКТРОНИКА»

Издается с 1996 г.

Периодичность журнала – 6 раз в год.



В центре внимания журнала – актуальные проблемы электроники. На его страницах освещаются результаты научно-исследовательских работ, выполненных в вузах и НИИ, методические аспекты преподавания с учетом современных требований и форм обучения, дается информация о научных конференциях. Формируются специальные выпуски по тематическому признаку.

## Подписку на журнал можно оформить:

- по каталогу «Газеты, журналы» Агентства «Роспечать» в любом почтовом отделении

Подписной индекс

47570

- через редакцию - с любого номера и до конца года

В редакции можно приобрести номера журнала за предыдущие годы. Подробную информацию о журнале можно получить, посетив сайт в интернете: <http://www.miet.ru/struct/151/>

Адрес редакции: 124498, Москва, К-498, Зеленоград, МИЭТ, комн.7232

Тел.: (095) 534-6205. Факс: (095) 530-54-29

E-mail: [magazine@rnd.miee.ru](mailto:magazine@rnd.miee.ru)

## СХЕМОТЕХНИКА –

### научно-технический журнал,

в котором публикуются материалы по различным направлениям радиоэлектроники. В нем описываются практические конструкции электронных устройств, работа с системами автоматизированного проектирования, теоретические основы радиоэлектроники, излагаются новые идеи, приводятся справочные данные на новые и перспективные компоненты и особенности их применения. Основные разделы журнала – Автоматика, Автоэлектроника, Аудиотехника, Измерительная техника, Источники питания, КВ/УКВ, Основы схемотехники, Электроника в быту, Системы безопасности, Цифровая техника, Связь и сетевые технологии, Софт, Технологии, Справочный листок.

Журнал уделяет большое внимание вопросам разработки микропроцессорных устройств – приводит сведения по современным микропроцессорам, рассказывает о приемах разработки программ для них, о способах и приборах для их программирования, публикует конструкции с использованием микропроцессоров.

Каждый номер содержит общеобразовательные статьи и десятки описаний разнообразных электронных устройств различного уровня сложности.

Конструкции, описываемые в журнале, могут представлять интерес не только для индивидуального повторения, но и для серийного или мелкосерийного производства.

Журнал систематически публикует описания устройств, которые можно изготовить из наборов, разработанных специалистами фирмы МАСТЕР КИТ. Журнал рассчитан на широкую читательскую аудиторию – на специалистов и инженеров, студентов профильных ВУЗов и радиолюбителей. Участие в создании журнала высококвалифицированных авторов, тщательная подготовка материалов, оригинальные схемотехнические решения и идеи способствуют его растущей популярности.

Периодичность выпуска – 12 номеров в год, объем 56–64 стр.

Подписной индекс в каталоге агентства "Роспечать" – 80724, в каталоге "Пресса России" – 41733, на Украине в каталоге KSS – 10540.

E-mail: [editor@dian.ru](mailto:editor@dian.ru), <http://www.dian.ru>  
тел./факс (095) 285-17-75.

121351, Москва, ул. Ивана Франко, д. 40, стр. 2.





## “Электронные компоненты и системы”

### Наивысшие достижения электроники на страницах журнала “ЭКиС”

Оформить подписку на журнал “ЭКиС” можно: **в Украине:** ■ в любом отделении связи по каталогу ДП “Преса” (подписной индекс 40633) ■ через курьерские службы доставки: “Саммит”, “KSS”, “Фактор-Запад”, “Ділова преса”, “Ідея”, “Міська кур’єрська служба” ■ через редакцию, позвонив по телефону (044) 2271356 или сделав запрос по электронной почте: [info@vdmals.kiev.ua](mailto:info@vdmals.kiev.ua) для получения подписного талона на сайте [www.vdmals.kiev.ua](http://www.vdmals.kiev.ua)  
**в России:** ■ в любом отделении связи по объединенному каталогу “Пресса России”



03058, г.Киев,  
 ул.Нежинская, 29-Е, офис 9  
 (044) 490-74-99, 490-74-30  
[info@chipnews.com.ua](mailto:info@chipnews.com.ua)  
<http://chipnews.com.ua>

Оформить подписку в Украине можно:

- по каталогу «Укрпочты» подписной индекс – 21934;
- по каталогу агентств «KSS», «Идея-Украина», «Саммит», «ПресЦентр» с курьерской доставкой;
- через редакцию, с любого номера.

Журнал “Chip News Украина / Инженерная микроэлектроника” - научно-технический журнал. На его страницах представлены обзоры, статьи, схемы, рекомендации по применению изделий электронной техники, дается анализ рынка электронных компонентов, состояние и тенденции его развития, экономические и правовые вопросы в области микроэлектроники, приводятся сведения о дистрибьюторах и фирмах-производителях.

Раздел «Инженерная микроэлектроника» - о микроконтроллерных системах, средствах их разработки и отладки, а также о компонентах этих систем (интегральные микросхемы, датчики, электромеханические и ферромагнитные изделия, пассивные компоненты).

Журнал предназначен для инженеров, разработчиков, руководителей, использующих в своих разработках зарубежные и отечественные электронные компоненты.

Периодически и *только для подписчиков* журнала прилагается один или два CD-диска различных фирм-производителей.

Вам понравился номер? Тогда:  
 а) продлите подписку на журнал по одному из адресов, приведенных на 2-й стр. обложки;  
 б) напишите письмо в редакцию.



Вам не понравился номер? Тогда:  
 б) напишите письмо в редакцию;  
 а) продлите подписку на журнал по одному из адресов, приведенных на 2-й стр. обложки.