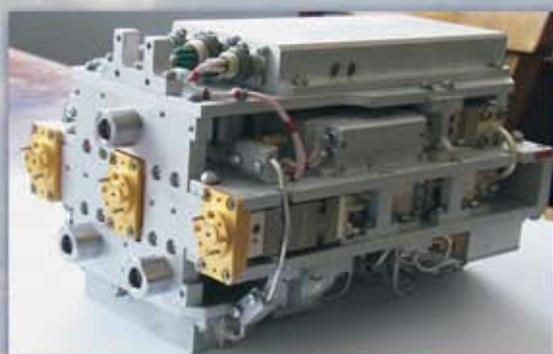


ТРА

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

К статье
«Твердотельные СВЧ-модули
для радиотехнической аппаратуры
и систем миллиметрового диапазона длин волн»



«Научно-исследовательский институт «Орион»
03680, г. Киев-57, ул. Эжена Потье, 8а, ndiorion@tsua.net

1 2016

ЯНВАРЬ — ФЕВРАЛЬ

СЕМНАДЦАТАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

23 – 27 мая 2016 года
Украина, г. Одесса

Реквизиты для связи
e-mail <tkea@optima.com.ua>
тел. +38 (048) 728-49-46,
728-18-50.

- Информационные системы и технологии
- Компьютерные системы и технологии
- Системы защиты информации
- Радиотехнические, телекоммуникационные и телевизионные системы
- Проектирование, конструирование, производство и контроль электронных средств
- Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ» ISSN 2225-5818

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 21788-11688ПР

Зарегистрирован в ВАК Украины по разделам «Физико-математические науки», «Технические науки»

Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев) и в Реферативном журнале ВИНТИ (г. Москва).

Включен в международную справочную систему по периодическим и продолжающимся изданиям "Ulrich's Periodicals Directory" (США), в международную систему библиографических ссылок CrossRef, в наукометрическую базу РИНЦ научной электронной библиотеки России, в базу данных DOAJ, в Google Scholar.

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

В Украине Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.
В России Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.
В Белоруссии Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 23785.
В редакции «ТКЭА» можно подписаться с любого номера.



Номер выпущен при поддержке
НПП «Сатурн», (г. Киев),
ЧАО «Украналит» (г. Киев),
НПП «Карат» (г. Львов),
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

Адрес редакции: Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17.
E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua,
тел. +38 (048)728-18-50, 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко,
А. А. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова.
Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корещук.

Подписано к печати 23.02.2016. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.
Печ. л. 6,0+1,0. Уч.-изд. л. 6,3. Тираж 150 экз. Заказ № 37.
Издательство «Политехперіодика»
(65044, г. Одесса-44, а/я 17).
Отпечатано в типографии РА «ART-V»
(65026, г. Одесса, ул. Гаванная, 3).

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2016

№ 1

Год издания 40-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмилё

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Чл.-корр. НАНУ,

д.ф.-м.н. А. Е. Беляев (г. Киев)

Д.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)

Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)

К.т.н. А. А. Дашковский (г. Киев)

Д.т.н. Г. А. Оборский (г. Одесса)

Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. С. Г. Антощук (г. Одесса)

Д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)

Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)

Д.т.н. А. П. Бондарев (г. Львов)

К.т.н. Э. Н. Глушеченко (г. Киев),

зам. главного редактора

Д.ф.-м.н. В. В. Должиков (г. Харьков)

К.т.н. И. Н. Еришчой (г. Одесса)

Д.т.н. А. А. Ефименко (г. Одесса),

зам. главного редактора

Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк (г. Киев)

Д.т.н. С. И. Круковский (г. Львов)

Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)

Чл.-корр. НАНУ,

д.ф.-м.н. В. С. Лысенко (г. Киев)

К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)

Д.т.н. И. Ш. Невлюдов (г. Харьков)

Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)

Д.ф.-м.н. С. В. Плаксин

(г. Днепропетровск)

К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)

К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)

Д.ф.-м.н. М. И. Самойлович (г. Москва)

К.т.н. П. С. Сафронов (г. Одесса),

отв. секретарь редколлегии

Д.т.н. В. С. Ситников (г. Одесса)

Д. т. н. Я. Стеванович (г. Белград)

Д. т. н. Э. Стевич (г. Белград)

Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)

К.т.н. В. Е. Трофимов (г. Одесса)

УЧРЕДИТЕЛИ

Институт физики полупроводников

им. В. Е. Лашкарёва

Научно-производственное

предприятие «Сатурн»

Одесский национальный

политехнический университет

Издательство «Политехпериодика»

Одобрено к печати

Ученым советом ОНПУ

(Протокол № 2 от 23.02 2016 г.)

Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

СОДЕРЖАНИЕ

СВЧ-техника

Твердотельные СВЧ-модули для радиотехнической аппаратуры и систем миллиметрового диапазона длин волн.
Н. Ф. Карушкин, С. Б. Мальцев, В. А. Хитровский 3

Системы передачи и обработки сигналов

Метод измерения амплитудной диаграммы направленности зеркальных параболических антенн в звуковом диапазоне частот.
А. В. Садченко, О. А. Кушниренко, М. Т. Аляхамиди, А. М. Алхади 8

Сенсоэлектроника

Детекторные свойства $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al$ под влиянием гамма-облучения малой дозы.
А. И. Кондрик 12

Обеспечение тепловых режимов

Система управления тепловыми режимами электронных приборов.
И. В. Цевух, В. В. Спивак, А. И. Малюта, Т. Н. Шуба 20

Интенсификация теплопередачи в жидкостных теплообменниках с каверна-штыревым оребрением.
В. Е. Трофимов, А. Л. Павлов 23

Технологические процессы и оборудование

Исследование линейной корреляционной связи в парных выборках малого объема.
В. С. Попукайло 27

Алгоритм выбора интервала пересчета параметров объектов контроля и управления в АСУ ТП.
А. Н. Тыныныка 33

Метрология. Стандартизация

Прибор для элементного анализа состава материалов с помощью спектра масс.
А. В. Косуля, В. Г. Вербицкий 39

Список рецензентов номера 46

Указатель статей, опубликованных в 2015 г. 47

Новые книги 11, 19, 32

ЗМІСТ

НВЧ-техніка

Твердотільні НВЧ-модулі для радіотехнічної апаратури і систем міліметрового діапазону довжин хвиль. *М. Ф. Карушкін, С. Б. Мальцев, В. А. Хитровський* (3)

Системи передачі та обробки сигналів

Метод вимірювання амплітудної діаграми спрямованості дзеркальних параболічних антен в звуковому діапазоні частот. *А. В. Садченко, О. А. Кушніренко, М. Т. Альхаміді, А. М. Алхаді* (8)

Сенсоелектроніка

Детекторні властивості $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al$ впливом гамма-опромінення малої дози. *О. І. Кондрік* (12)

Забезпечення теплових режимів

Система управління тепловими режимами електронних приладів. *І. В. Цевух, В. В. Снівак, А. І. Малюта, Т. І. Шуба* (20)

Інтенсифікація теплопередачі в рідинних теплообмінниках з каверна-штирьовим оребренням. *В. Є. Трофімов, О. Л. Павлов* (23)

Технологічні процеси та обладнання

Дослідження лінійного кореляційного зв'язку в парних вибірках малого обсягу. *В. С. Попукайло* (27)

Алгоритм вибору інтервалу перерахунку параметрів об'єктів контролю та управління в АСУ ТП. *О. М. Тининіка* (33)

Метрологія. Стандартизація

Прилад для вимірювання елементного складу матеріалів за допомогою спектра мас. *О. В. Косуля, В. Г. Вербицький* (39)

CONTENTS

Microwave engineering

Solid state microwave modules designed for millimeter wave electronic equipment and systems. *N. F. Karushkin, S. B. Maltsev, V. A. Khitrovskiy* (3)

Signals transfer and processing systems

Method of measuring the amplitude directivity pattern of parabolic mirrored antennas in the audio frequency range. *A. V. Sadchenko, O. A. Kushnirenko, M. T. Al'khamidi, A. M. Alkhadi* (8)

Sensors

Detector properties of $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al$ under the influence of low dose gamma irradiation. *A. I. Kondrik* (12)

Thermal management

Thermal management system for electronic devices. *I. V. Tsevukh, V. V. Spivak, A. I. Malyuta, T. I. Shuba* (20)

Intensification of heat transfer in liquid heat exchangers with dimple-pin finning. *V. Ye. Trofimov, A. L. Pavlov* (23)

Production technology and equipment

The linear correlation research in paired small volume samples. *V. S. Popukaylo* (27)

The algorithm for selection of interval of parameters recalculation of control and management objects in automatic control systems of process engineering. *A. N. Tynnyka* (33)

Metrology. Standardization

Instruments for measuring elemental composition of materials by mass spectrum. *A. V. Kosulya, V. G. Verbitskiy* (39)

К. т. н. Н. Ф. КАРУШКИН, к. ф.-м. н. С. Б. МАЛЬЦЕВ, В. А. ХИТРОВСКИЙ

Украина, г. Киев, Научно-исследовательский институт «Орион»

E-mail: ndiorion@tsua.net

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СВЧ-МОДУЛИ ДЛЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ И СИСТЕМ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Представлен научно-технический и производственно-технологический потенциал НИИ «Орион» в области создания твердотельных комплексированных СВЧ-модулей, которые изготавливаются на собственных кремниевой и арсенид-галлиевой технологических линиях. Совокупность этих изделий составляет элементную базу для перспективной аппаратуры, оборудования и систем, работающих в диапазоне частот до 200 ГГц.

Ключевые слова: синтезатор частот, генератор волн миллиметрового диапазона, умножитель частоты, модулятор, фазовращатель, усилитель, приемопередающий СВЧ-модуль, Si-ЛПД, p-i-n-диоды.

Государственный научно-исследовательский институт «Орион» в настоящее время является ведущим предприятием Украины в области создания электровакуумных и полупроводниковых приборов, компонентов и устройств, работающих в диапазоне частот до 200 ГГц. В данной статье представлен научно-технический и производственно-технологический потенциал института.

В НИИ «Орион» создана научная школа исследования и разработки полупроводниковых СВЧ-компонентов и устройств миллиметрового диапазона длин волн. Имеющиеся кремниевая и арсенид-галлиевая технологии позволяют создавать высококачественные активные и пассивные СВЧ-приборы, модули и компоненты, а также многофункциональные устройства на их основе. Твердотельная компонентная база радиотехнической аппаратуры и оборудования диапазона частот до 200 ГГц [1, 2] включает в себя:

- многофункциональные твердотельные устройства (синтезаторы частот, приемные, передающие и приемопередающие СВЧ-модули);
- однофункциональные полупроводниковые СВЧ-компоненты (генераторы, усилители, умножители частоты, смесители, переключатели, аттенюаторы, модуляторы, фазовращатели);
- полупроводниковые СВЧ-приборы (Si IMPATT-диоды, p-i-n-диоды, GaAs диоды Ганна).

Технический уровень научно-технической продукции НИИ «Орион» не уступает лучшим образцам мировой СВЧ-электроники. Ряд СВЧ-компонентов не имеет аналогов, а их характеристики существенно превышают уровень известных зарубежных компонентов. НИИ «Орион»

является лидером в области разработки и изготовления мощных твердотельных передающих устройств с выходной мощностью 50–100 Вт в 8-мм, 25–30 Вт в 3-мм и 1,5–2,0 Вт в 2-мм диапазонах длин волн (при длительности импульса 100–200 нс и скважности 200–400).

Особо значительны достижения НИИ «Орион» в области создания всей совокупности приборов и устройств, составляющих компонентную базу для создания радиоэлектронной аппаратуры миллиметрового диапазона длин волн (8-, 5-, 3- и 2 мм), к которой в последнее время во всем мире наблюдается повышенный интерес. Радиотехнические системы миллиметрового диапазона позволяют обеспечить недоступные в других участках спектра электромагнитных волн информативность и помехоустойчивость при одновременной минимизации массогабаритных характеристик и параметров энергопотребления.

Имеющийся в НИИ уникальный технологический цикл разработки СВЧ-приборов и компонентов предполагает детальное автоматизированное проектирование твердотельных СВЧ-узлов, что позволяет выполнять моделирование как отдельных компонентов, так и многофункциональных устройств. Автоматизированное проектирование и производство эффективно используется на всех этапах разработки и изготовления приборов, обеспечивая оптимизацию их характеристик и высокую степень надежности и повторяемости выходных параметров конечной продукции.

Используемое в НИИ специализированное лабораторно-стендовое и контрольно-испытательное оборудование позволяет выполнить детальный анализ и оценку технических характеристик всех выпускаемых приборов, компонентов и модулей на различных этапах сбор-

ки, а также имитировать многообразные условия эксплуатации СВЧ-модулей, в том числе их способность нормально функционировать при воздействии различных факторов внешней среды.

Особое место в научно-технической и производственной деятельности НИИ «Орион» занимает разработка элементов компонентной базы СВЧ-техники, предназначенной для создания современной радиолокационной аппаратуры и оборудования, в том числе:

- РЛС ближнего действия с высокой разрешающей способностью по дальности различного назначения [3];

- РЛС для навигационной аппаратуры и систем дистанционного контроля параметров окружающей среды;

- бесконтактные датчики прецизионного измерения уровня заполнения объемов сыпучими и жидкими средами;

- бесконтактные высокоточные измерители параметров движения наземных и воздушных объектов, предназначенных для контроля и управления движением транспортных средств;

- метеорологические РЛС.

Имеющиеся технические возможности и 50-летний опыт успешной работы в области создания прецизионной аппаратуры позволили специалистам НИИ «Орион» создать целый ряд высококлассных многофункциональных синтезаторов частот для использования в современных когерентных бортовых радиолокационных системах с высокой разрешающей способностью.

Когерентность является одним из важных отличительных признаков современной радиолокационной системы, поскольку на нынешнем этапе развития радиолокационной техники именно когерентная обработка принятых сигналов позволяет достигать необходимого уровня характеристик обнаружения РЛС и ее помехозащищенности. В частности, разработанный сверхмалощумящий виброустойчивый многофункциональный быстродействующий фазокогерентный синтезатор частот для вертолетной РЛС формирует сетку частот первого гетеродина (36 частот, время переключения 2–8 мкс по критерию остаточной фазовой погрешности 5 градусов), фиксированную частоту второго гетеродина, вторую промежуточную частоту, а также опорную и тактовую частоты. Реально измеренные значения фазовых шумов синтезируемых сигналов первого гетеродина (X-диапазон) составляют минус 110 дБн/Гц при отстройке 1 кГц, 115 дБн/Гц при отстройке 10 кГц и 125 дБн/Гц при отстройке 100 кГц. Относительная нестабильность всех синтезируемых частот в интервале рабочих температур от минус 50°C до 60°C составляет $1,5 \cdot 10^{-6}$. Следует отметить, что такой высокий уровень параметров достигнут при массе синтезатора 7 кг и потребляемой мощности менее 23 Вт [4].

Для работы в составе когерентной РЛС управления движением судов при подходе к портам, а

также для обзора летного поля аэродромов, специалистами НИИ «Орион» разработан твердотельный приемопередатчик. Он выполнен в виде отдельного герметизированного блока, обеспечивает выходную мощность не менее 50 Вт в диапазоне частот 33,5–34,5 ГГц (длительность импульса 35 или 200 нс, скважность 800). Высокая чувствительность приемного устройства достигается применением малощумящего усилителя, что позволяет получить коэффициент шума всей системы $K_{ш}$ не более 5 дБ. С целью обеспечения нормальной работы приемного устройства используется защитное устройство. На входе малощумящего усилителя установлен калибровочный генератор шума, включаемый внешним сигналом. Динамический диапазон в пределах 70 дБ обеспечивается за счет применения усилителя промежуточной частоты с логарифмической характеристикой. Управление длительностью импульса и частотой полезного сигнала осуществляется внешними командами.

Использование данного приемопередающего устройства в составе когерентной РЛС управления движением судов обеспечивает высокую разрешающую способность по дальности. Малое энергопотребление (около 20 Вт) позволяет осуществлять питание приемопередатчика от автономного источника, а также использовать его в качестве бортового оборудования. Перспективным является создание сети с центральным диспетчерским пунктом, данные на который поступают от распределенных по обозреваемой территории приемопередающих модулей [5].

В течение нескольких лет в НИИ «Орион» проводилась разработка приемопередающих модулей для семейства мобильных когерентных РЛС ближнего и среднего радиуса действия, предназначенных для обнаружения движущихся людей и техники с целью разведки или обеспечения охраны территории [6, 7]. Многолетний опыт поставок приемопередатчиков в ХК ОАО «Укрспецтехника» для работы в составе мобильных РЛС ближнего радиуса действия «Барсук» с непрерывным фазоманипулированным излучением (см. рис. 1, а) позволил специалистам НИИ «Орион» создать гораздо более совершенную модель носимой РЛС «Горноста́й» (см. рис. 1, б).

Кроме существенно меньших габаритов, массы и потребляемой мощности (менее 7 Вт), к преимуществам данной РЛС по сравнению с прототипом следует отнести гораздо меньшую (в пять раз!) среднюю излучаемую мощность при той же дальности обнаружения и при значительном (в 1,5 раза) уменьшении апертур передающей и приемной антенн. Высокие показатели портативной РЛС обеспечиваются использованием нового приемопередатчика с квазинепрерывным режимом излучения и внутриимпульсной фазовой модуляцией, а также применением улучшенной корреляционно-фильтровой



Рис. 1. РЛС «Барсук» (а) и «Горноста́й» (б) в процессе эксплуатации

обработки принимаемых сигналов. Все это позволяет не только резко повысить обнаруживающую способность минарадар, но и реализовать функцию временной автоматической регулировки усиления, что обеспечивает уверенное обнаружение целей в ближней (до 300 м) зоне. При мощности передатчика 30–50 мВт РЛС «Горноста́й» может обнаруживать идущего человека на расстоянии до 800 м, а объекты типа автомобиль — до 2 км. Конструкция этой РЛС защищена патентом Украины №67326.

Среди промышленных применений радиолокационных датчиков особое место занимают системы для измерения уровня материалов и веществ в резервуарах. Бесконтактный радиолокационный принцип измерений позволяет эффективно и надежно работать в условиях экстремальных температур, давления, запыленности и в химически агрессивной среде. Созданный в НИИ «Орион» малогабаритный приемопередатчик W -диапазона применяется в составе радиолокационного уровнемера, предназначенного для сверхвысокочастотного непрерывного и бесконтактного измерения уровня жидких, пастообразных, твердых и сыпучих веществ в резервуарах на промышленных и энергетических предприятиях, в том числе на химических и нефтеперерабатывающих заводах.

Схема приемопередатчика позволяет реализовать очень высокую точность измерения — погрешность составляет ± 1 мм. Конструкция приемопередатчика обеспечивает эффективное и безопасное функционирование всей системы в широком интервале измеряемых величин, в разнообразных условиях среды, в том числе химически агрессивных и токсичных, а также при воздействии температуры, давления, при наличии паров, тумана и пыли. В комплексной измерительной системе применяются не только передовые СВЧ-технологии, но и современная цифровая обработка сигналов, включающая автокалибровку и самодиагностику, что существенно облегчает установку и техническое обслуживание оборудования [8].

Специалистами института для работы в составе РЛС W -диапазона разработан твердотельный когерентный приемопередатчик, в котором частота передающего канала и частота гетеродина приемного канала задаются от единого внешнего источника сантиметрового диапазона, что обеспечивает когерентную работу всего устройства. В схеме приемопередатчика использованы конкурентоспособные технические решения, выполненные на основе оригинальных кремниевых микроволновых технологий. Импульсный передатчик, как и гетеродин приемника, выполнен на основе активных кремниевых умножительных модулей миллиметрового диапазона длин волн, обеспечивающих высокую эффективность преобразования частоты при высокой кратности умножения. Роль ключевого элемента в этих модулях играет активный умножитель частоты на кремниевом умножительном лавинно-пролетном диоде (ЛПД), оптимизированном для работы в этом диапазоне. Это обеспечивает высокую эффективность преобразования частоты сигнала при больших кратностях умножения, к тому же, что особенно важно, процесс умножения происходит без существенной шумовой деградации фазы.

В импульсном передатчике используется активный умножитель частоты с коэффициентом умножения 15 и трехкаскадный твердотельный усилитель импульсного действия с внешней синхронизацией. Каждый усилительный каскад выполнен по отражательной схеме с использованием специально разработанных мощных кремниевых импульсных ЛПД. Выходная импульсная мощность передатчика составляет 10 Вт при длительности импульса выходного сигнала 60–80 наносекунд и частоте повторения импульсов 10–50 кГц.

В приемнике, построенном по гетеродинной схеме, используются балансные смесители на GaAs-диодах с барьером Шоттки. Для улучшения параметров приемника балансные смесители конструктивно выполнены совместно с малошумящими усилителями промежуточной частоты. В качестве гетеродина в приемнике используется непрерывный умножитель частоты с коэффициентом умножения 15, выполненный на основе специально сконструированного ЛПД.

Для работы в составе РЛС для волн 3-мм диапазона разработан двухканальный приемопередаточный модуль, который обеспечивает выходную импульсную мощность каждого канала 10 Вт на частоте 94 ГГц при длительности импульса выходного сигнала порядка 60–80 нс и частоте повторения импульсов 50 кГц. Передающее устройство модуля состоит из стабилизированного резонатором генератора на ЛПД, делителя мощности, двух усилителей с внешней синхронизацией и импульсного модулятора. Стабильность частоты задающего генератора не хуже 10^{-3} в интервале температур от -40 до $+55^\circ\text{C}$, что обеспечивается применением высокочастотного инварового резонатора. Резонатор работает на вол-

не H_{011} и включен в генератор по схеме стабилотрона. Сигнал задающего генератора разделяется на два канала с помощью делителя мощности. В каждом канале передатчика установлен усилитель с внешней синхронизацией с коэффициентом усиления порядка 6 дБ. Усилители выполнены на кремниевых ЛПД и включены по отражательной схеме.

Стабилизация характеристик импульсного задающего генератора и импульсных усилителей в пределах длительности импульса и в интервале внешних температурных воздействий осуществляется методом токовой стабилизации. Такая схема реализации передатчика обеспечивает формирование когерентных сигналов на двух выходах, сдвинутых относительно друг друга по фазе на 90° .

Приемник построен по гетеродинной схеме и имеет в своем составе два балансных смесителя на GaAs диодах с барьером Шоттки. Для улучшения параметров приемника балансные смесители конструктивно выполнены совместно с малошумящими усилителями промежуточной частоты. В качестве гетеродина в приемнике используется стабилизированный резонатор генератор на двухпролетном ЛПД с рабочей частотой 91,7 ГГц и стабильностью рабочей частоты гетеродина не хуже 10^{-3} в интервале рабочих температур. Коэффициент шума каждого приемного канала составляет порядка 9 дБ, коэффициент усиления каждого канала — не менее 20 дБ.

В течение ряда лет НИИ «Орион» выпускает СВЧ-модули двухмиллиметрового диапазона волн для радиолокационных систем, в том числе:

- электрически управляемые аттенуаторы с рабочей полосой частот 2 ГГц, с максимальным ослаблением 40 дБ и начальным ослаблением 1,0 дБ;
- быстродействующие модуляторы с рабочей полосой частот 2 ГГц, развязкой между каналами 20 дБ, прямыми потерями не более 2,5 дБ и с быстродействием не более 10 нс;
- генераторы импульсного действия с выходной мощностью не менее 100 мВт при длительности импульса 40–60 нс и частоте повторения 20 кГц;
- генераторы шума импульсного действия с мощностью шума 46 дБ и неравномерностью 3,0 дБ (длительность импульса выходного сигнала 75 нс, частота повторения импульсов 10,5 кГц);
- генераторы, управляемые напряжением, для использования в качестве гетеродина приемных устройств 2-мм диапазона длин волн с выходной мощностью не менее 20 мВт в рабочей полосе частот 2 ГГц. Выполнены на основе умножителя частоты с высокой кратностью умножения. В качестве источника внешнего синхронизирующего сигнала может использоваться транзисторный генератор или синтезатор частоты. При подаче на вход сигнала в диапазоне $14,0 \pm 0,1$ ГГц и при кратности умножения 10 генератор обеспе-

чивает непрерывную мощность порядка 25 мВт в рабочем диапазоне частот $140,0 \pm 1,0$ ГГц.

Для работы в 8-миллиметровом диапазоне длин волн разработаны и поставляются автогенераторы и усилители с внешней синхронизацией импульсного действия с выходной мощностью в импульсе от 20 до 100 Вт с длительностью СВЧ-импульса 50–200 нс при скважности не менее 300.

Для использования в РЛС ближнего диапазона в 8-миллиметровом диапазоне создан малогабаритный полупроводниковый генератор импульсного действия с электронным переключением частот. В качестве задающего стабильного источника СВЧ-импульсов разработан малогабаритный синтезатор частоты 8-миллиметрового диапазона длин волн, формирующий СВЧ-импульсы заданной длительности с уровнем мощности 1–1,2 Вт. Синхронизированный усилитель на ЛПД обеспечивает мощность на выходе генератора до 15–20 Вт при длительности СВЧ-импульсов 100–300 нс в рабочей полосе не менее 1 ГГц. Количество переключаемых частот не менее 6 при частоте повторения 6 кГц. Длительность фронтов СВЧ-импульсов на выходе генератора составляет не более 20 нс [9].

Успешный опыт эксплуатации модулей СВЧ миллиметрового диапазона длин волн показал, что состояние техники этого диапазона позволяет успешно реализовать весь комплекс технических требований к аппаратуре различного назначения: РЛС, систем связи, приборов и устройств двойного применения, обеспечивая при этом высокую надежность работы при всех погодных условиях и небольших массогабаритных параметрах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Болтовец Н.С., Мальцев С.Б., Руденко В.Г., Рукин В.П. 50 лет развития СВЧ-электроники в НИИ «Орион» // Техника и приборы СВЧ. — 2011. — №2. — С. 3–6.
2. Болтовец Н.С., Мальцев С.Б. Развитие полупроводниковых СВЧ-технологий в НИИ «Орион» // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2011. — №1–2. — С. 65–68.
3. Звершовский И.В., Карушкин Н.Ф., Пойгина М.И., Ярешко Ю.П. и др. Твердотельный радиолокатор ближнего действия для охраны объектов // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 1999. — Т. 42, №1. — С. 3–11.
4. Хитровский В.А., Бугай В.М., Сидько В.И. Опыт разработки синтезаторов частот для современных радиолокационных систем // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — №2. — С. 4–7.
5. Гололобов В.П., Ищенко М.Г., Цвир А.В. Твердотельный приемопередатчик Ка-диапазона с выходной мощностью 50 Вт для импульсных РЛС // 2-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». — Украина, Харьков. — 2005. — Т. 5. — С. 101.
6. Хитровский В. А., Беркута Д. Н. Экономичный когерентный приемопередатчик Ка-диапазона для мобильных РЛС

ближнего радиуса действия // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2003. — №3. — С. 33–34.

7. Хитровский В.А., Бугай В.М., Коржик О.А. Когерентный приемопередатчик Ka-диапазона для мобильных РЛС среднего радиуса действия // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — №2. — С. 11–13.

8. Бас И. А., Дручило А.В., Маковенко С.В. и др. Твердотельный приемопередатчик для FMCW-радаров прецизионного измерения уровня W-диапазона // Прикладная радиоэлектроника. — 2008. — Т. 7, №1. — С. 86–89.

9. Карушкин Н. Ф., Дворниченко В. П., Мальшко В. В. и др. Полупроводниковый генератор импульсного действия с электронным переключением частоты миллиметрового диапазона // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Украина, г. Севастополь. — 2012. — С. 103–105.

Дата поступления рукописи
в редакцию 29.10.2015 г.

М. Ф. КАРУШКИН, С. Б. МАЛЬЦЕВ, В. А. ХИТРОВСКИЙ

Научно-дослідний інститут «Оріон»
E-mail: ndiorion@tsua.net

ТВЕРДОТІЛЬНІ НВЧ-МОДУЛІ ДЛЯ РАДІОТЕХНІЧНОЇ АПАРАТУРИ І СИСТЕМ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ

Представлено науково-технічний і виробничо-технологічний потенціал НДІ «Оріон» в області створення твердотільних комплексованих НВЧ-модулів, які виготовляються на власних кремнієвій і арсенід-галієвій технологічних лініях. Сукупність цих виробів складає елементну базу для перспективної апаратури, устаткування і систем, що працюють в діапазоні частот до 200 ГГц.

Ключові слова: синтезатор частот, генератор міліметрового діапазону, помножувач частоти, модулятор, фазообертач, підсилювач, приймально-передавальний НВЧ-модуль, Si-ЛПД, p-i-n-діоди.

DOI: 10.15222/TKEA2016.1.03
UDC 621.373.5.52:621.373.29

N. F. KARUSHKIN, S. B. MALTSEV, V. A. KHITROVSKIY

Research Institute «Orion»,
E-mail: ndiorion@tsua.net

SOLID STATE MICROWAVE MODULES DESIGNED FOR MILLIMETER WAVE ELECTRONIC EQUIPMENT AND SYSTEMS

The paper presents scientific, technological and production potential of Research Institute «Orion» in the field of creation of wide range of high performance active and passive solid-state microwave devices, modules and components as well as multifunctional devices on their basis. These products taken as a whole form a component base for promising equipment and systems working in the frequency range from 1.0 to 200 GHz.

Key words: frequency synthesizer, millimeter wave range oscillator, frequency multiplier, modulator, phase shifter, amplifier, microwave transceiver, Si-IMPATT, p-i-n-diodes.

REFERENCES

1. Boltovets M.S., Maltsev S.B., Rudenko V.G., Rukin V.P. [50 years of microwave electronics development in the RI «Orion».] *Tekhnika i pribory SVCh*, 2011, no. 2, pp. 3–6. (Rus)
2. Boltovets M. S., Maltsev S. B. [The Development of solid-state microwave technology in the RI «Orion».] *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*. 2011, no 1–2, pp. 65–68. (Rus)
3. Zvershovskiy I.V., Karushkin N.F., Poygina M.I., Yareshko Y.P., etc. [Solid-state short-range radar to protect objects.] *Izvestiya vuzov. Elektronika*. 1999, vol. 42, no. 1, pp. 3–11. (Rus)
4. Khitrovskiy V.A., Bugay V.M., Sidko V.I. [Expertise in the design of frequency synthesizers for modern radar systems.] *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*. 2007, no. 2, pp. 4–7. (Rus)
5. Gololobov V. P., Ishchenko M. G., Tsvir A.V. [Ka-band solid-state transceiver of 50 W output power for pulse radars.] *2nd International radio electronic forum «Applied radio electronics. The state and prospects of development»*. Kharkiv, Ukraine. 2005, vol. 5, pp. 101. (Rus)

6. Khitrovskiy V.A., Berkuta D.N. [Cost-effective coherent transceiver Ka-band mobile radars near field.] *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*. 2003, no 3, pp. 33–34. (Rus)
7. Khitrovskiy V.A., Bugay M.V., Korzhik O.A. Ka band coherent transceiver for mobile radars of medium range. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*. 2007, no 2, pp. 11–13. (Rus)
8. Bass I.A., Drucilla A.V., Makovenko S.V., Maltsev S.B., Molchanova S.D., Odnolko A.F., Rudik V.I., Sobolev D.V. [Solid-state transceiver for FMCW radar for precise measurement of the level of the W range.] *Applied radio electronics*. 2008, vol. 7, no. 1, pp. 86–89. (Rus)
9. Karushkin N.F., Dvornichenko P.V., Malysko V.V., Orekhovskiy V.A., Tsvir A.V. [Semiconductor pulse oscillator with electronic frequency switching in millimeter range.] *22nd International Crimean conference «Microwave equipment and telecommunication technologies»*, Ukraine, Sevastopol, 2012, pp. 103–105. (Rus)

К. т. н. А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО, М. Т. АЛЬХАМИДИ, А. М. АЛХАДИ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: anjand@mail.ru, kuuk@mail.ru

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДНОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ЗЕРКАЛЬНЫХ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ АНТЕНН В ЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Предложена методика измерения направленных свойств зеркальных параболических антенн в звуковом диапазоне частот с использованием дешевой элементной базы, основанная на методе полигонных измерений. Показана взаимосвязь эквивалентных частот, лежащих в различных диапазонах, и определены требования к минимальным размерам антенны.

Ключевые слова: диаграмма направленности, коэффициент направленного действия, апертура, прямофокусная зеркальная антенна, метод полигонных измерений, эквивалентная звуковая частота.

Одними из самых широко используемых антенн в диапазоне сверхвысоких частот являются антенны с плоским излучающим раскрывом или апертурные антенны. Поскольку это основной тип радиолокационных антенн, они находят применение в радионавигации, радиоастрономии, радиотелеуправлении, системах спутникового телевидения. Особенно широко распространены зеркальные и рупорные антенны, с помощью которых достаточно просто формируются диаграммы направленности (ДН) не только остронаправленные, но и специальной формы [1].

Диаграмма направленности или графическое представление зависимости коэффициента усиления (коэффициента направленного действия) антенны от направления антенны в заданной плоскости [2] является основной характеристикой, описывающей ее направленные свойства.

Существует несколько подходов к измерению диаграммы направленности, причем в большинстве случаев измеряется только амплитудная ДН.

Основными методами измерения диаграммы направленности являются следующие [1]:

- полигонные измерения в дальней зоне антенны;
- облет исследуемой антенны по заданной траектории;
- коллиматорный метод;
- апертурно-зондовый метод измерения в ближней зоне антенны;
- измерение диаграммы направленности на модели антенны.

При выборе способа измерения ДН существенное значение имеют экономические затраты, связанные со строительством измерительных антенных полигонов больших размеров, безэховых измерительных камер, и затраты на СВЧ измерительную аппаратуру [3]. Организация измерений ДН непосредственно в СВЧ-диапазоне

является достаточно дорогостоящим предприятием, в то время как стоимость генерирующих и приемных устройств для акустического (звукового) диапазона частот на несколько порядков ниже.

В настоящей работе для оценки формы амплитудной диаграммы направленности зеркальных антенн в СВЧ-диапазоне и на звуковых частотах предлагается использовать метод звукового эквивалента, основанный на идентичности числовых значений коэффициента направленного действия.

За основу предлагаемого метода выбран метод полигонных измерений ДН в дальней зоне антенны, поскольку в этом случае не требуется вносить изменения в конструкцию исследуемой антенны.

Упрощенная структурная схема метода полигонных измерений приведена на **рис. 1**. Исследуемая антенна 3, работающая в режиме приема, расположена на опорно-поворотном механизме 4. На расстоянии r в дальней зоне антенны расположена вспомогательная передающая антенна 2, возбуждаемая генератором 1. Приемное устройство 5 снабжено индикатором 6

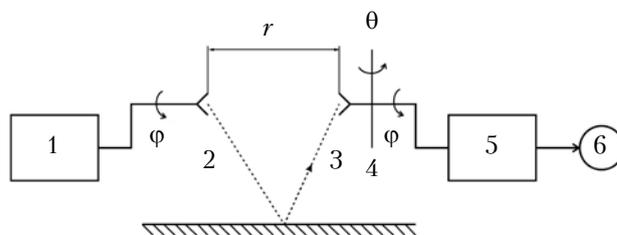


Рис. 1. Структурная схема полигонного метода измерения ДН:

1 – генератор; 2 – вспомогательная передающая антенна; 3 – исследуемая антенна; 4 – опорно-поворотный механизм; 5 – приемное устройство; 6 – индикатор

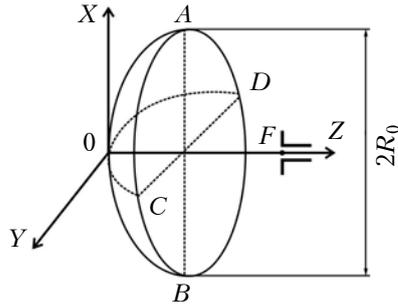


Рис. 2. Конструкция прямофокусной зеркальной антенны с рефлектором в виде параболоида вращения (OF – фокусное расстояние)

сти, поступающей на вход приемного устройства. Зависимость показаний индикатора от угла поворота θ антенны 4 при фиксированном угле φ является сечением ДН по мощности.

Поскольку форма рефлектора зеркальной параболической антенны и профили пирамидального и конического рупоров не зависят от частоты, их направленные свойства можно измерять в звуковом диапазоне частот. При этом эквивалентная звуковая частота должна обеспечивать то же значение коэффициента направленного действия (КНД), что и в СВЧ-диапазоне.

Определим требования к эквивалентным параметрам схемы акустического измерителя ДН на примере прямофокусной зеркальной антенны (рис. 2).

Коэффициент направленного действия апертурных антенн и плоских антенных решеток [4] в направлении главного максимума определяется соотношением

$$D_0 = \frac{4\pi S_a}{\lambda^2} \nu, \quad (1)$$

где ν – коэффициент использования поверхности, зависящий от амплитудного распределения поля в раскрытии параболоида, $0 < \nu \leq 1$ ($\nu=1$ в случае равномерного распределения поля);

λ – рабочая длина волны;

S_a – площадь апертуры (для прямофокусной зеркальной параболической антенны $S_a = \pi R_0^2$ – площадь раскрытия параболоида, где R_0 – радиус рефлектора).

Длина электромагнитной волны связана со скоростью света C ($3 \cdot 10^8$ м/с) и ее рабочей частотой f :

$$\lambda = \frac{C}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{f}. \quad (2)$$

Коэффициент направленного действия антенны в звуковом диапазоне частот определяется как

$$D_{03} = \frac{4\pi S_a}{\lambda_3^2}. \quad (3)$$

Рабочая длина звуковой волны связана со скоростью звука $C_{3В}$ (равна 340 м/с при 20°C и атмосферном давлении $P=101$ кПа) и с ее рабочей частотой f_3 :

$$\lambda_3 = \frac{C_{3В}}{f_3} = \frac{340}{f_3}. \quad (4)$$

Определим частоту звукового диапазона, при которой коэффициент направленного действия будет таким же, как в СВЧ-диапазоне (т. е. $D_{03}=D_0$), при неизменных геометрических параметрах антенны.

Для определенности примем, что амплитудный закон распределения электромагнитного поля в раскрытии рефлектора является равномерным, т. е. $\nu=1$. Приравняв выражения (1) и (3) и проведя преобразования с учетом формул (2) и (4), получим

$$\frac{f_3}{C_{3В}} = \frac{f}{C}. \quad (5)$$

Таким образом, частоты в звуковом и в электромагнитном диапазонах связаны между собой следующими тождественными выражениями:

$$f_3 = \frac{f C_{3В}}{C}, \quad f = \frac{f_3 C}{C_{3В}}. \quad (6)$$

Следует отметить, что направленное распространение имеет плоская звуковая волна, которая образуется в том случае, если минимальный линейный размер излучателя превышает длину волны. Преобразование плоской волны в сферическую в рефлекторе зеркальной параболической антенны произойдет в том случае, если диаметр антенны больше длины принятой волны.

В таблице приведены эквивалентные частоты звукового и электромагнитного диапазона, а также соответствующие им минимальные размеры приемной антенны.

Структурная схема измерителя ДН в звуковом диапазоне приведена на рис 3.

Эквивалентные частоты звукового и СВЧ-диапазонов и соответствующие им значения минимального радиуса рефлектора

F_3 , кГц	F , ГГц	$R_0=\lambda_3$, м	F_3 , кГц	F , ГГц	$R_0=\lambda_3$, м
1	0,88	0,34	11	9,7	0,031
2	1,76	0,14	12	10,6	0,028
3	2,64	0,11	13	11,5	0,026
4	3,52	0,085	14	12,35	0,024
5	4,41	0,07	15	13,23	0,023
6	5,29	0,057	16	14,11	0,021
7	6,18	0,048	17	15	0,02
8	7,06	0,042	18	15,88	0,018
9	7,94	0,038	19	16,76	0,018
10	8,82	0,034	20	17,65	0,017

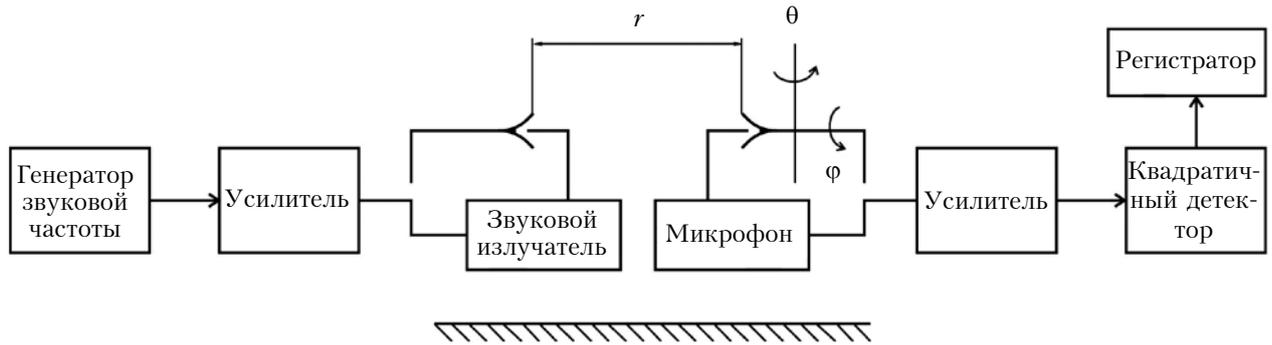


Рис. 3. Структурная схема измерителя диаграммы направленности в звуковом диапазоне

В предложенной схеме измерителя ДН в качестве излучателя звуковой волны можно использовать, например, акустический рупор с экспоненциальным профилем, обеспечивающим согласование акустических сопротивлений излучателя и воздушной среды.

В фокусе параболоида вращения устанавливается ненаправленный микрофон, амплитудно-частотная характеристика которого позволяет проводить измерения в заданном диапазоне частот. Выход микрофона можно подключать через усилитель и квадратичный детектор к аналоговому либо цифровому вольтметру, осциллографу, низкочастотному анализатору спектра и т. д.

Заключение

Предложенная схема для измерения диаграммы направленности зеркальных параболических антенн в звуковом диапазоне частот позволяет добиться существенного сокращения материальных затрат на организацию и проведение полигонных испытаний с целью оценки характеристик направленности апертурных антенн. Также ее можно применять для измерения характери-

стик направленности пирамидальных и конических рупорных антенн, линейные размеры апертуры которых превышают длину эквивалентной звуковой волны.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. Д. И. Воскресенского. – Москва: Радио и связь, 2012.
2. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / Под ред. В. Ф. Кравченко. – Москва: Физматлит, 2011.
3. Зелкин Е.Г., Кравченко В. Ф., Гусевский В. И. Конструктивные методы аппроксимации в теории антенн. – Москва: Сайнс-Пресс, 2005.
4. Садченко А.В., Кушниренко О.А., Троянский О.В. Алгоритм синтеза линейных антенных решеток с требуемой диаграммой направленности и целочисленными амплитудными коэффициентами // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2015. – № 2-3. – С. 15–18. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2015.2-3.15>

Дата поступления рукописи
в редакцию 20.11 2015 г.

А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО,
М. Т. АЛЬХАМІДІ, А. М. АЛХАДІ

Україна, Одеський національний політехнічний університет
E-mail: anjand@mail.ru, kuuk@mail.ru

МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ АМПЛІТУДНОЇ ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНОСТІ ДЗЕРКАЛЬНИХ ПАРАБОЛІЧНИХ АНТЕН В ЗВУКОВОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

Вимірювання діаграми спрямованості апертурних антен безпосередньо в мікрохвильовому діапазоні потребує достатньо великих витрат. Водночас, вартість генерувальних та приймальних пристроїв для частот акустичного діапазону є на кілька порядків меншою. В даній роботі запропоновано методику вимірювання спрямованих властивостей дзеркальних параболических антен в звуковому діапазоні частот з використанням дешевої елементної бази. За основу обрано метод полігонних вимірювань, який не потребує внесення змін до конструкції антени, що досліджується. Показано взаємозв'язок еквівалентних частот, що лежать в різних діапазонах, і визначено вимоги до мінімальних розмірів антени.

Ключові слова: діаграма спрямованості, коефіцієнт спрямованої дії, апертура, прямофокусна дзеркальна антена, метод полігонних вимірювань, еквівалентна звукова частота.

METHOD OF MEASURING THE AMPLITUDE DIRECTIVITY PATTERN
OF PARABOLIC MIRRORED ANTENNAS IN THE AUDIO FREQUENCY RANGE

Directivity pattern (DP) or graphical representation of the dependence of gain factor (directivity gain) of antennas on the direction of the antenna in the target plane is the main characteristic that describes its directional properties.

Running DP measurements directly in the microwave range is very expensive. While generating and receiving devices for the acoustic frequency range are reasonably priced.

In this paper, we propose a method for measuring the amplitude directivity pattern of parabolic mirrored antennas on the basis of sound equivalent, which is based on the identity of the numerical values of the directivity gain of microwave range, and at audio frequencies.

The paper presents analytical expressions for the calculation of equivalent frequency and defines the requirements for the minimum size of the antenna.

The paper contains a modified block diagram for an amplitude directivity pattern meter for parabolic mirrored antennas in the audio frequency range.

Keywords: directivity pattern, directional factor, aperture, direct focal reflector antenna, polygon measurements method, equivalent audio frequency.

REFERENCES

1. *Ustroistva SVCh i anteny. Proektirovanie fazirovannykh antenykh reshetok* [Microwave devices and antennas. The design of phased antenna arrays]. Ed. by D.I.Voskresenskii. Moscow, Radio i svyaz', 2012, 746 p. (Rus)
2. *Tsifrovaya obrabotka signalov i izobrazhenii v radiofizicheskikh prilozheniyakh* [Digital signal and image processing applications in radiophysical]. Ed. by V.F.Kravchenko. Moscow, Fizmatlit, 2011, 544 p. (Rus)

3. Zelkin E.G., Kravchenko V. F., Gusevskii V. I. *Konstruktivnye metody approksimatsii v teorii antenn* [Constructive methods of approximation in the theory of antennas]. Moscow, Sains-Press, 2005, 512 p. (Rus)
4. Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Troyansky A. V. [Algorithm for the synthesis of linear antenna arrays with desired radiation pattern and integral amplitude coefficients]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2015, no 2-3, pp. 15-18. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.2-3.15> (Rus)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Бурачок Р. А., Климаш М. М., Коваль Б. В. Телекомунікаційні системи передавання інформації. Методи кодування.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

Розглянуто питання організації систем передавання даних та методів кодування та декодування двійкової інформації. Описано принципи побудови типових двійкових кодів та наведено їх характеристики. Для найчастіше використовуваних на практиці кодів наведено структурні схеми кодерів і декодерів та алгоритми їхньої роботи.

Для студентів напрямів “Телекомунікації”, “Інформаційні мережі зв'язку” та ін., а також для інженерно-технічних працівників, які займаються розробленням і створенням систем передавання інформації. Для самоперевірки рівня засвоєння матеріалу у кінці кожної глави наведено відповідні питання та задачі.



А. И. КОНДРИК

Украина, ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

ДЕТЕКТОРНЫЕ СВОЙСТВА $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al$ ПОД ВЛИЯНИЕМ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ МАЛОЙ ДОЗЫ

Проведен анализ и указаны возможные причины изменений характеристик глубоких уровней в высокоомном $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al$ после γ -облучения и в течение пострadiaционной релаксации. Исследована зависимость свойств плоскопараллельного детектора на основе $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al$ от концентрации и уровня энергии глубокого донора, а также от степени легирования алюминием. Определены условия деградации регистрирующих свойств детектора на начальном этапе его эксплуатации под воздействием агрессивной радиационной среды.

Ключевые слова: $CdZnTe$, гамма-облучение, детекторы, моделирование, глубокие уровни.

Высокоомные полупроводники $CdZnTe$ широко применяются в качестве материалов для детекторов γ - и рентгеновского излучения. В процессе эксплуатации эти детекторные материалы подвергаются интенсивному воздействию излучения, в результате чего в решетке возникают радиационные дефекты, а в запрещенной зоне появляются мелкие и глубокие уровни, действующие как центры захвата свободных носителей заряда. Ионизирующие излучения влияют на электрические и транспортные свойства, например на удельное сопротивление ρ и время жизни τ неравновесных носителей заряда, а также ухудшают энергетическое разрешение детекторов, вызывая сдвиг спектральных пиков, что может привести к полной потере эффективности сбора зарядов. Исследования влияния дефектов на регистрирующие свойства детекторов, а также поведения дефектов под воздействием агрессивной радиационной среды являются очень важными для улучшения детекторных характеристик. При этом значительную трудность представляет точное измерение параметров дефектов: концентрации N_T , сечения захвата σ , положения уровня их энергии в запрещенной зоне E_a . Основной причиной указанной проблемы считается высокое удельное сопротивление, которое для $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$ достигает 10^{10} Ом·см.

В настоящее время для измерения характеристик уровней дефектов в $CdZnTe$ используются различные методики, например термостимулированная токовая спектроскопия TSC (thermally stimulated current spectroscopy), термоэлектрическая эмиссионная спектроскопия TEES (thermoelectric emission spectroscopy). Широко применяется такая разновидность нестационарной спектроскопии глубоких уровней, как фотостимулированная токовая нестационарная спек-

троскопия PICTS (photoinduced current transient spectroscopy). Однако проведенные в [1–3] исследования электрофизических и транспортных свойств $CdZnTe$ показали, что удельное сопротивление и время жизни, вычисленные на основе измеренных методом PICTS [4–6] концентраций N_T и уровней энергии E_a , в некоторых случаях отличаются на два-три порядка от известных величин.

Измерение N_T , σ , E_a осуществляется с помощью методик, основанных на принудительном заполнении энергетических уровней электронами и дырками с последующей их эмиссией в соответствующие зоны. Измерение тока носителей заряда, эмитированных с уровней в широком интервале температур, позволяет получить спектры с явно выраженными пиками при некоторых температурах, соответствующих определенным положениям уровня энергии. Высота пиков и их ширина определяются, соответственно, концентрацией уровней и сечением захвата носителей заряда. Перекрытие этих пиков может не только заметно исказить истинные величины N_T , E_a и σ , но и привести к неправильной идентификации уровней, регистрации несуществующих или потере реальных уровней дефектов. Интересная попытка решения данной проблемы предложена в [7, 8], где для интерпретации спектров TSC и определения характеристик уровней дефектов использован метод SIMPA (simultaneous multiple peak analysis), в котором осуществляется подгонка теоретической кривой, состоящей из суммы отдельных пиков уровней, под экспериментальные спектры. Определенные таким образом N_T , E_a и σ для каждого уровня хорошо коррелируют с данными, полученными с помощью других методик [8].

Таким образом, очевидно, что корректное измерение параметров уровней дефектов, влияющих на характеристики детекторов на основе CdZnTe, является весьма затруднительным. По этой причине для исследования изменений электрофизических и детекторных свойств CdZnTe под воздействием γ -излучения необходимо кроме экспериментальных результатов дополнительно использовать численное моделирование.

Целью настоящей работы было изучение изменения удельного сопротивления $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al$ и эффективности сбора зарядов детекторов на его основе, работающих под воздействием малой дозы γ -излучения. Исследование проводилось методом компьютерного моделирования, в котором в качестве исходных служили данные, полученные в [9], где использовались TSC-спектры, обработанные методом SIMPA.

Исходные данные и методы расчета

В таблице представлены значения концентрации N_T , положение уровня энергии E_a и сечения захвата технологических и радиационных дефектов $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al$, приведенные в [9]. Уровни энергии акцепторов отсчитываются от валентной зоны, доноров — от зоны проводимости. Методом TSC были измерены характеристики девяти дефектов, десятый же, который является глубоким донором, был зарегистрирован путем записи спектра темнового тока без фотозвуждения. Поскольку таким методом можно измерить лишь положение уровня энергии, но не концентрацию и сечение захвата, для глубокого донора E_{dd} сечение захвата было установлено равным $5 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$, что по порядку вели-

чины соответствует сечениям захвата соседних уровней. Это дало значение времени жизни неравновесных носителей заряда примерно 10^{-6} с . Концентрация N_{dd} донора глубокого уровня E_{dd} варьировалась в широких пределах, что позволило исследовать момент перехода от низкоомного к полужолирующему состоянию, в котором работают современные детекторы.

При вычислении ρ сначала численно решалось уравнение электронейтральности и определялись концентрации свободных электронов (n) и дырок (p) с точностью не хуже 10^{-7} . В уравнение были включены концентрации и уровни энергии 10 дефектов, представленные в таблице, а также легирующего Al, который является мелким донором. Затем рассчитывалась подвижность μ_n электронов на основе классической теории рассеяния с учетом традиционных механизмов рассеяния на примесях и фононах (подвижность дырок μ_p принималась равной $70 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$). Удельное сопротивление рассчитывалось по формуле

$$\rho = (en\mu_n + ep\mu_p)^{-1},$$

где e — заряд электрона.

Детектор предполагался плоскопараллельным с расстоянием 5 мм между электродами, напряженность электрического поля — 1000 В/см . Время жизни носителей заряда, дрейфующих в межэлектродном пространстве детектора, определялось согласно теории Шокли — Рида — Холла. Полученные значения подвижности, времени жизни носителей заряда и параметры детектора подставлялись в формулу Хегга [10], и таким образом определялась эффективность сбора зарядов.

Параметры уровней дефектов в $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al$, полученные методом TSC до облучения образца, сразу после γ -облучения дозой 2,7 кГр и через месяц [9]

Уровень	Энергия E_a , эВ			Концентрация N_T , см^{-3}			Сечение захвата σ , см^2		
	до облучения	после облучения	месяц спустя	до облучения	после облучения	месяц спустя	до облучения	после облучения	месяц спустя
$E_1^-(Ag, Au)$	0,047	—	0,051	$3 \cdot 10^{14}$	—	$6,6 \cdot 10^{14}$	$1,16 \cdot 10^{-14}$	—	$9,44 \cdot 10^{-14}$
$E_2^+(V_{Cd})$	0,094	0,102	0,099	$3,6 \cdot 10^{14}$	$3,9 \cdot 10^{14}$	$4,0 \cdot 10^{14}$	$3,63 \cdot 10^{-19}$	$3,72 \cdot 10^{-19}$	$3,75 \cdot 10^{-19}$
$E_3^-(A)$	0,127	0,129	0,128	$1,5 \cdot 10^{14}$	$1,2 \cdot 10^{14}$	$1,8 \cdot 10^{14}$	$1,08 \cdot 10^{-18}$	$8,8 \cdot 10^{-19}$	$9,77 \cdot 10^{-19}$
$E_4^+(Te_{Cd})$	0,185	—	—	$8,1 \cdot 10^{13}$	—	—	$4,06 \cdot 10^{-18}$	—	—
$E_5(C)$	0,236	0,232	0,234	$4,2 \cdot 10^{13}$	$3,1 \cdot 10^{14}$	$3,3 \cdot 10^{14}$	$2,18 \cdot 10^{-18}$	$1,00 \cdot 10^{-18}$	$9,56 \cdot 10^{-19}$
$E_6^-(Cu)$	0,291	0,309	0,312	$4,1 \cdot 10^{14}$	$5,5 \cdot 10^{14}$	$5,8 \cdot 10^{14}$	$1,71 \cdot 10^{-18}$	$1,91 \cdot 10^{-18}$	$1,82 \cdot 10^{-18}$
$E_7^{2+}(Te_{Cd})$	0,371	0,368	0,372	$4,6 \cdot 10^{14}$	$3,5 \cdot 10^{14}$	$3,8 \cdot 10^{14}$	$6,66 \cdot 10^{-18}$	$7,77 \cdot 10^{-18}$	$7,61 \cdot 10^{-18}$
$E_8^{2-}(V_{Cd})$	0,507	0,488	0,487	$7,2 \cdot 10^{14}$	$9,5 \cdot 10^{14}$	$8,8 \cdot 10^{14}$	$2,83 \cdot 10^{-18}$	$2,74 \cdot 10^{-18}$	$2,99 \cdot 10^{-18}$
$E_9^-(V_{Zn})$	0,620	0,621	0,624	$1,1 \cdot 10^{14}$	$2,0 \cdot 10^{14}$	$2,7 \cdot 10^{14}$	$6,8 \cdot 10^{-17}$	$9,16 \cdot 10^{-18}$	$9,68 \cdot 10^{-18}$
E_{dd}^+	0,554	0,792	0,782	$1 \cdot 10^{14} - 4,9 \cdot 10^{15}$			$5,0 \cdot 10^{-18}$		

Анализ исходных данных, результаты и обсуждение

Из таблицы видно, что в ходе облучения и последующей выдержки образцов в течение месяца изменяются все параметры (N_T , E_a , σ) всех зарегистрированных дефектов. Такой результат весьма неожидан, поскольку даже в процессе γ -облучения, при котором выбиваются атомы из узлов решетки и увеличивается концентрация радиационных дефектов, не может измениться концентрация (а также σ и E_a) всех дефектов. Тем более непонятно изменение N_T , σ и E_a всех дефектов в течение пострadiационной выдержки.

Тем не менее, можно предположить, что в ходе γ -облучения и последующей выдержки в результате различных диффузионных и релаксационных процессов изменяется зарядовое состояние локальных центров и комплексов дефектов. Это в свою очередь изменяет соотношение между концентрациями заряженных центров ионного остова и свободных носителей заряда, т. е. степень компенсации полупроводника. С другой стороны, в [11] на примере кремния было экспериментально показано, что измеренные значения концентрации электрически активных атомов легирующей примеси зависят от типа и концентрации исходных примесей. В этой работе также сделан вывод о том, что в зависимости от степени компенсации материала и условий эксперимента одни и те же примесные атомы с глубокими энергетическими уровнями могут внести в запрещенную зону полупроводника различные величины этих уровней, которые соответствуют определенным состояниям в кристаллической решетке. По-видимому, этим можно объяснить и рассматриваемые нами результаты из [9], свидетельствующие об изменениях параметров $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$ в процессе и после облучения.

Таким образом, опираясь на исследования [9] и сделанные в [11] выводы, можно заключить, что в случае сильнокомпенсированного CdZnTe нарушаются условия локальной электронейтральности в решетке, изменяется потенциал вокруг дефекта и дефектная структура кристаллической решетки. При этом система находится в неравновесном состоянии, и воздействие температуры, давления, а также электрического поля атомов ионного остова изменяет электронную структуру дефектов и условия взаимодействия дефектов и свободных носителей заряда. По этой причине глубокие уровни дефектов решетки в этих условиях, в отличие от некомпенсированного полупроводника, не имеют фиксированных состояний, а постоянно перестраиваются под воздействием внешних факторов. При этом каждому квазиравновесному состоянию решетки соответствуют только определенные состояния дефектов и примесей (положение их в решетке, энергетические уровни). Так что

состояние дефектов, примесных атомов и соответствующие им энергетические уровни не являются фиксированными, а могут иметь различные значения в зависимости от степени компенсации материала и условий эксперимента [11].

Данные, представленные в таблице, получены путем обработки TSC-спектров, записанных в температурном интервале 25 — 310 К, где мелким уровням соответствовали низкотемпературные пики, а глубоким — пики при повышенной температуре вплоть до комнатной. Однако разным значениям температуры соответствует разная степень компенсации и, следовательно, разные квазиравновесные состояния. Детекторы γ -излучения на основе CdZnTe работают при комнатной температуре, т. е. в условиях, отличных от условий измерения N_T , E_a и σ для большинства уровней. Таким образом, очевидно, что метод TSC и другие современные методики не позволяют получить точные значения N_T , E_a , σ глубоких уровней при рабочих температурах детектора на основе сильнокомпенсированного CdZnTe . В связи с этим имеет смысл проводить исследование электрофизических и детекторных свойств CdZnTe:Al в широком интервале концентраций и энергий глубоких уровней дефектов, особенно тех, которые заметно влияют на захват носителей заряда в материале детектора.

Легирование алюминием — это традиционное введение мелкого донора для компенсации мелких акцепторов и частичной компенсации глубоких акцепторов, в роли которых выступают двукратно заряженные вакансии кадмия V_{Cd}^{2-} (уровень E_8 , см. таблицу) и однократно заряженные вакансии цинка V_{Zn}^- (уровень E_9). Последние активно участвуют в процессах захвата носителей заряда, дрейфующих в межэлектродном пространстве, поэтому сильно влияют на регистрирующие свойства детектора. После компенсации мелких акцепторов и вакансий кадмия V_{Cd}^{2-} концентрация свободных носителей заряда определяется соотношением между концентрациями глубокого акцептора V_{Zn}^- и глубокого донора, обозначенного в таблице как E_{dd}^+ , который и обеспечивает высокоомные свойства материала ($\rho \approx 10^{10}$ Ом·см). Предварительные расчеты показали, что для рассматриваемого случая оптимальной является концентрация алюминия $N_{\text{Al}} = 8 \cdot 10^{14}$ см⁻³.

Было проведено исследование зависимости удельного сопротивления ρ исходного материала от концентрации N_{dd} и энергии глубокого донора. Полученные трехмерные зависимости приведены на рис. 1 для двух концентраций вакансий цинка (E_{dd} отсчитывается от валентной зоны).

Из рис. 1 видно, что наилучшее для работы детектора удельное сопротивление $\rho > 10^{10}$ Ом·см находится в области энергии глубокого донора $E_{dd} \approx 0,8$ эВ, отсчитываемой от валентной зоны. Ширина запрещенной зоны $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$ при комнатной температуре равна 1,57 эВ.

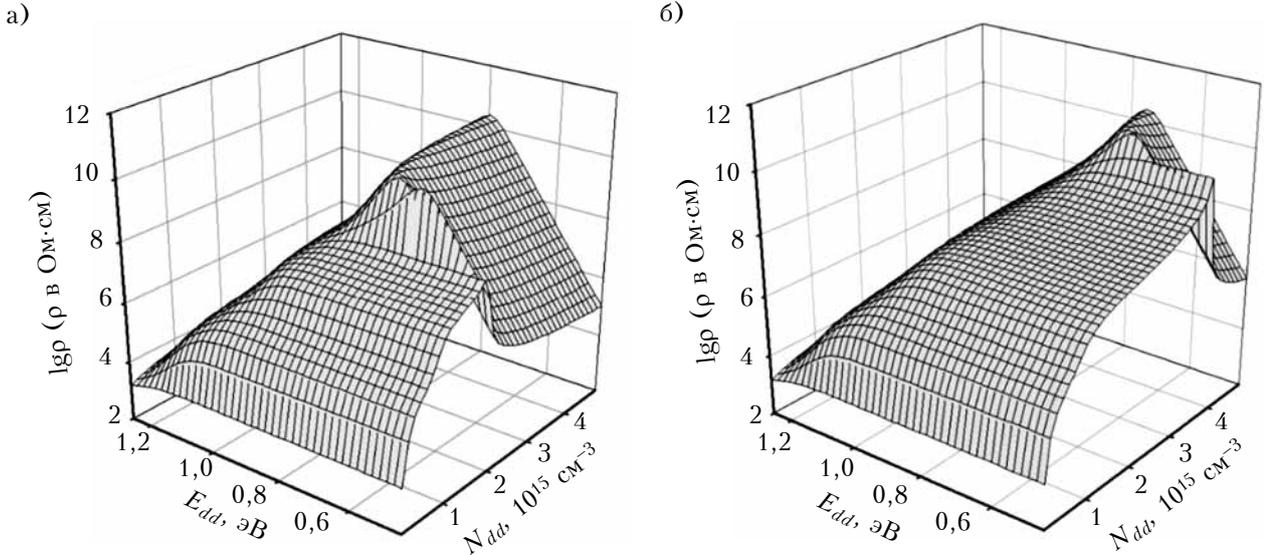


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления необлученного $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al$ от концентрации и энергии глубокого донора при концентрации V_{Zn} , равной $1,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (а) и $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (б) (параметры остальных дефектов приведены в таблице)

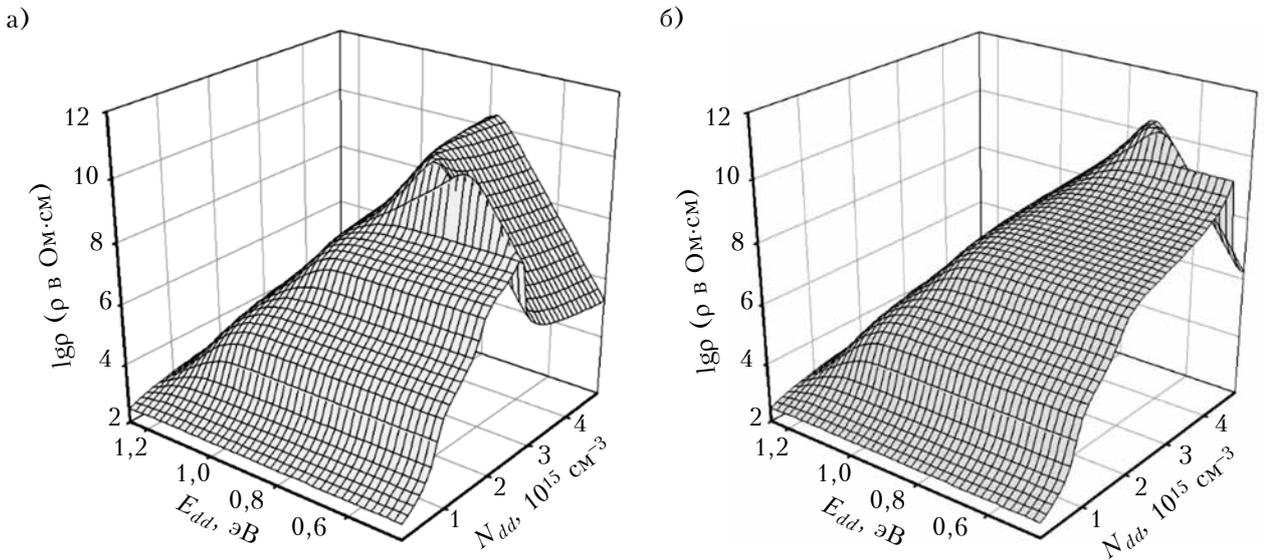


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al$, облученного γ -квантами дозой 2,7 кГр, от концентрации и энергии глубокого донора при концентрации вакансии кадмия $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (а) и $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (б) (параметры остальных дефектов приведены в таблице)

Относительно низкоомное плато (примерно $10^7 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) перед высокоомным пиком соответствует неполной компенсации двукратно заряженных вакансий кадмия. С увеличением концентрации V_{Zn} уменьшается высокоомная область, пригодная для работы детектора. Кроме того, с увеличением концентрации V_{Zn} изменяется уровень энергии глубокого донора, который необходим для достижения полуизолирующего состояния $\rho > 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, т. е. донор должен становиться более глубоким. Таким образом, в зависимости от конкретного состава материала существует некоторая критическая концентрация вакансий цинка, выше которой происходит неприемлемое снижение ρ на два-три порядка.

Детекторы на основе $CdZnTe$ в процессе эксплуатации подвергаются γ -облучению, которое даже в малых дозах влияет на характеристики глубоких доноров и вакансий цинка, т. е. дефектов, наиболее сильно влияющих на ρ и захват носителей заряда. Из таблицы видно, что особенно заметно изменяется уровень энергии глубокого донора. На рис. 2 показаны зависимости удельного сопротивления облученного $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al$ от концентрации и энергии глубокого донора (для удобства сравнения эти зависимости рассчитаны в тех же диапазонах изменения N_{dd} и E_{dd} , что и на рис. 1).

Из сравнительного анализа приведенных на рис. 1 и рис. 2 данных можно заключить, что

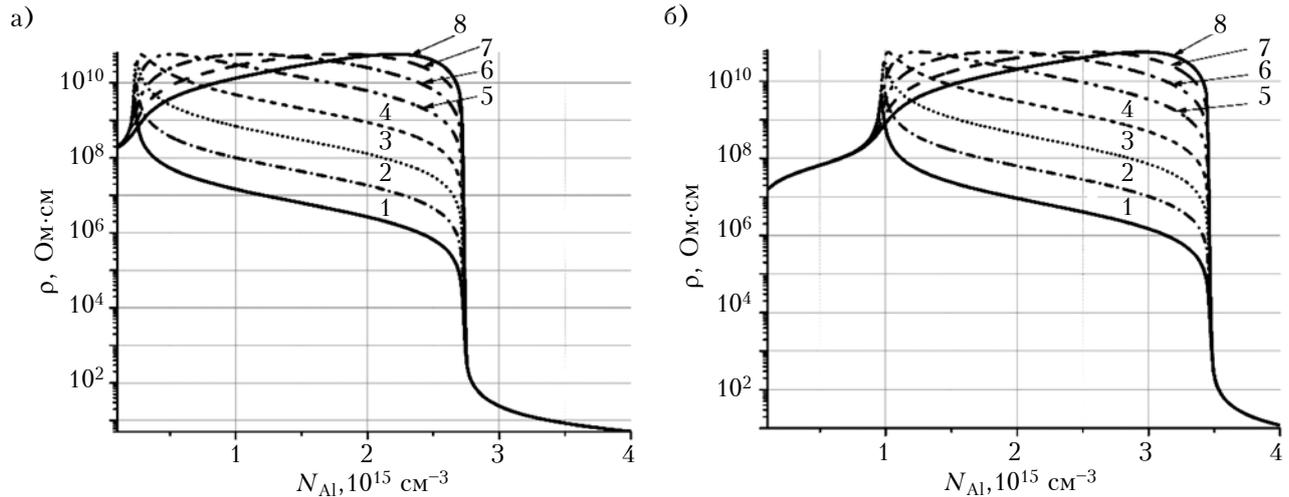


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}:\text{Al}$ от концентрации легирующего Al в исходном материале (а) и после γ -облучения дозой 2,7 кГр (б) для разных уровней энергии E_{dd} , отсчитываемых от зоны проводимости (в эВ):
 1 – 0,554; 2 – 0,604; 3 – 0,654; 4 – 0,704; 5 – 0,754; 6 – 0,792; 7 – 0,821; 8 – 0,842

даже малая доза γ -облучения приводит к уменьшению области высокоомного состояния, т. е. к началу процесса деградации удельного сопротивления материала. Такой вывод несколько противоречит результатам работы [9], авторы которой зафиксировали увеличение ρ после облучения. Однако увеличение или уменьшение ρ в каждом конкретном случае определяется соотношением между действительными концентрациями и уровнями энергии дефектов, точно измерить которые не представляется возможным для сильнокомпенсированного материала.

Для более точного анализа были рассчитаны зависимости удельного сопротивления $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}:\text{Al}$ от концентрации алюминия до и после облучения для разных уровней энергии глубокого донора E_{dd} , представленные на рис. 3 (кривая 1 на рис. 3, а и кривая 6 на рис. 3, б рассчитаны для указанных значений E_{dd} , полученных путем измерений). Дефектный состав материала показан в таблице.

Из приведенных данных следует, что удельное сопротивление материала, так же как и в [9], после малой дозы γ -облучения образца увеличивается. Эти результаты согласуются также с результатами работы [12], где было зарегистрировано увеличение ρ на начальном этапе γ -облучения.

Как видно из рис. 3, графики зависимости $\rho(N_{\text{Al}})$ облученных образцов сдвигаются по сравнению с исходными в сторону больших концентраций алюминия, что согласуется с выводами работ [2, 3], где исследовалась деградация детекторных свойств $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ под воздействием рентгеновского облучения. Значит, если концентрация легирующего алюминия недостаточно велика, то в процессе эксплуатации можно получить преждевременное снижение ρ , приводя-

щее к увеличению токов утечки и уменьшению отношения сигнал/шум, что вызывает деградацию регистрирующей способности детектора. В [9] для необлученного образца была зафиксирована энергия глубокого донора $E_{dd}=0,554$ эВ и $\rho=7,5 \cdot 10^9$ Ом·см, а для облученного – $E_{dd}=0,792$ эВ и $\rho=5,6 \cdot 10^{10}$ Ом·см. Однако, судя по кривой 1 на рис. 3, а, при тех параметрах и составе дефектов исходного образца, при которых проводились измерения, почти невозможно получить его высокоомное состояние при любом уровне легирования за исключением очень узкой области при $N_{\text{Al}}=2,37 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$, когда $\rho=2,6 \cdot 10^9$ Ом·см. При этом указанное высокоомное состояние сразу же деградирует в ходе облучения, что противоречит эксперименту, где ρ увеличивается. Причиной такого несоответствия результатов является невозможность точного измерения характеристик и состава дефектов CdZnTe с помощью современных методик, о чем говорилось выше. В связи с этим оперировать точными значениями концентрации и энергии дефектов нет смысла, достаточно лишь качественно рассмотреть динамику поведения радиационных дефектов.

В моделирующую программу в качестве исходных данных были введены экспериментально измеренные характеристики дефектов материала до и после облучения, приведенные в таблице. Вычислялись зависимости удельного сопротивления, а также эффективности η сбора зарядов, дрейфующих из середины межэлектродного пространства детектора, от концентрации легирующего алюминия.

Из приведенных на рис. 4, а результатов моделирования видно, что удельное сопротивление материала возрастает не только в процессе облучения, но и в течение последующего месяца. То же самое можно сказать и о сдвиге гра-

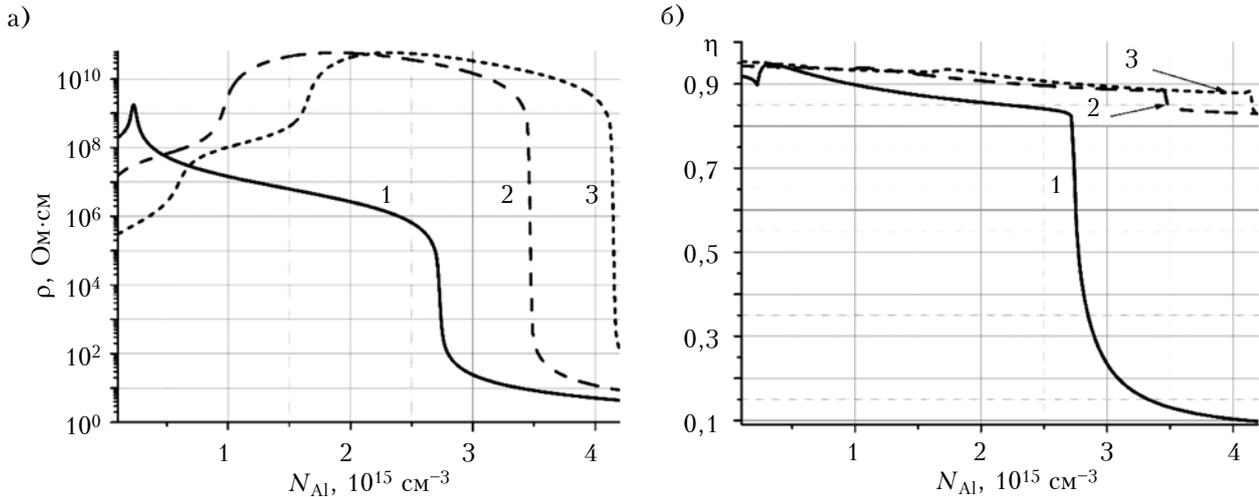


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления (а) и эффективности сбора зарядов (б) от концентрации легирующего алюминия в $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al$:
 1 — исходный образец; 2 — после γ -облучения дозой 2,7 кГр; 3 — через месяц после облучения

фиков зависимости $\rho(N_{Al})$ в сторону больших значений N_{Al} .

Эффективность сбора зарядов детектора на основе необлученного $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al$ коррелирует с его удельным сопротивлением: сохраняет высокие значения не только в высокоомной области ($\rho \approx 10^9$ Ом·см), но и в области значений $\rho \approx 10^6 - 10^7$ Ом·см, и значительно деградирует при резком падении ρ до низкоомных величин (кривая 1 на рис 4, б). Что касается облученного материала, в нем эффективность сбора зарядов сохраняется высокой во всей исследуемой области концентраций Al (кривые 2, 3), а заметное ее снижение (примерно до 0,4) происходит при значительно больших, чем показано на рисунке, концентрациях алюминия ($N_{Al} \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$).

Таким образом, регистрирующие свойства детектора на основе $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al$ могут ухудшиться уже на начальной стадии его эксплуатации только лишь из-за снижения удельного сопротивления (из-за смещения кривой $\rho(N_{Al})$ вправо), что вызовет увеличение токов утечки и заметное ухудшение отношения сигнал/шум. Эффективность же сбора зарядов детектора, облученного малой дозой γ -квантов, даже несколько увеличивается по сравнению с необлученным.

Выводы

Таким образом, на основании анализа результатов проведенных исследований можно заключить следующее.

1. Точное измерение характеристик всех уровней дефектов в высокоомном и сильнокомпенсированном $CdZnTe$ не представляется возможным с помощью современных методик, основанных на записи спектров в широком температурном интервале, поскольку при этом возникают различные квазиравновесные состояния, определяющие различные параметры уровней. Измерение же характеристик глубоких уровней, которые реально влияют на захват носителей заряда, осу-

ществляется при температурах, близких к рабочим температурам детектора, что делает возможным исследование качественных изменений свойств детектора, работающего под воздействием ионизирующего излучения.

2. На регистрирующие свойства детектора на основе $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$ отрицательно влияет повышенная концентрация вакансий цинка, которая может возникнуть как на стадии изготовления, так и под воздействием γ -облучения в процессе эксплуатации.

3. При облучении детектора на основе $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al$ в процессе эксплуатации зависимость удельного сопротивления от концентрации легирующего алюминия N_{Al} смещается в сторону больших концентраций Al, т. е. происходит деградация его свойств. Это имеет место в случае малых значений N_{Al} , причем на начальном этапе облучения произойдет снижение только удельного сопротивления, а эффективность сбора зарядов может даже немного повыситься. При достаточно высоком уровне легирования на начальном этапе облучения происходит увеличение и удельного сопротивления материала, и эффективности сбора зарядов детектора на его основе.

Что касается дальнейших исследований, то поскольку современные детекторы работают в условиях облучения и тяжелыми частицами, представляет интерес изучение изменений свойств детектора на основе $CdZnTe$ под влиянием бомбардировки нейтронами с целью сравнения полученных при этом результатов с выводами и результатами настоящего исследования, а также [2, 3].

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кондрик А. И. Эффективность сбора зарядов в датчиках γ -излучений с различной конфигурацией электродов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2012. — № 4. — С. 47–51.

2. Kondrik A. I. Effect of irradiation on properties of CdTe detectors // East European Journal of Physics. — 2014. — Vol. 1, N 1. — P. 47–52.

3. Kondrik A. I. Influence of radiation-induced defects on CdTe and CdZnTe detectors properties // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. — 2015. — Vol. 96, N 2. — P. 18–24.

4. Castaldini A., Cavalini A., Fraboni B. Deep levels in CdTe and CdZnTe // J. Appl. Phys. — 1998. — Vol. 83, N 4. — P. 2121–2126.

5. Fraboni B., Pasquini L., Castaldini A. et al. X-ray irradiation effects on the trapping properties of Cd_{1-x}Zn_xTe detectors // J. Appl. Phys. — 2009. — Vol. 106, P. 093713. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.3253748>

6. Hofmann D. M., Stadler W., Christmann P., Meyer B. K. Defects in CdTe and Cd_{1-x}Zn_xTe // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1996. — Vol. 380, N 1–2. — P. 117–120.

7. Pavlović M., Desnica U. V., Gladić J. Complete set of deep traps in semi-insulating GaAs // J. Appl. Phys. — 2000. — Vol. 88, N 8. — P. 4563. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.1308072>

8. Pavlović M., Jakšić M., Zorc H., Medunić Z. Identification of deep trap levels from thermally stimulated current spectra of semi-insulating CdZnTe detector material // J. Appl. Phys. — 2008. — Vol. 104, N2. — P. 023525. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.2959354>

9. Ruihua Nan, Wanqi Jie, Gangqiang Zha et al. Irradiation-induced defects in Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te:Al // Journal of Electronic Materials. — 2012. — Vol. 41, N 11. — P. 2044–2049. — <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-012-2204-5>

10. Akutagawa W., Zanio K. Gamma response of semi-insulating material in the presence of trapping and detrapping // J. Appl. Phys. — 1969, Vol. 40, N 9. — P. 3838–3854. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.1658281>

11. Садуллаев А. Б. Состояние примесных атомов с глубокими уровнями в полупроводниках в условиях сильной компенсации // Молодой ученый. — 2011. — Т. 1, № 12. — С. 48–50.

12. Cavallini A., Fraboni B., Dusi W. et al. Deep levels and compensation in γ -irradiated CdZnTe / Appl. Phys. Lett. — 2000. — Vol. 77, N 20. — P. 3212–3214. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.1324980>

Дата поступления рукописи
в редакцию 06.10 2015 г.

О. І. КОНДРИК

Україна, ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут»

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

ДЕТЕКТОРНІ ВЛАСТИВОСТІ Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al ПІД ВПЛИВОМ ГАММА-ОПРОМІНЕННЯ МАЛОЇ ДОЗИ

Проведено аналіз та вказано можливі причини змін характеристик глибоких рівнів у високоомному Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al під час γ -опромінення та протягом пострадіаційної релаксації. Досліджено залежність властивостей плоскопаралельного детектора на основі Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al від концентрації та рівня енергії глибокого донора, а також від ступеня легування алюмінієм. Визначено умови деградації реєструвальних властивостей детектора на початковому етапі його експлуатації під впливом агресивного радіаційного середовища.

Ключові слова: CdZnTe, гамма-опромінення, детектори, моделювання, глибокі рівні.

DOI: 10.15222/ТКЕА2016.1.12
UDC 621.315.592.3

A. I. KONDRİK

Ukraine, NSC «Kharkov Institute of Physics and Technology»

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

DETECTOR PROPERTIES OF Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al UNDER THE INFLUENCE OF LOW DOZE GAMMA IRRADIATION

Clarification of the influence of defects on detecting properties of CdZnTe detectors and understanding of the behavior of defects under the influence of aggressive radiation environment are very important to improve detector performance. The objective was to study the charges collection efficiency and the resistivity of Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al detectors operating under the influence of low dose γ -radiation. The study was carried out by computer simulation, where initial data were provided by the experiment results of other researchers. The possible reason for the change of measured signatures of defect levels in high resistance Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al during gamma irradiation and 1 month later is the change in compensation degree of the material. The changes in the properties of Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al detector have been researched depending on the concentration and energy level of the deep donor for different concentrations of deep acceptors, as well as on the degree of alloying with aluminum. The negative factor for registering properties of Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al detector is increased concentration of zinc vacancies, which may arise at manufacturing stage and under influence of γ -irradiation

during operation. The degradation of properties of irradiated detector may occur due to the offset dependence of the resistivity on the aluminum dopant concentration $N(\text{Al})$ towards to higher concentrations of Al when the value of doping is not enough large. Only resistivity will be reduced and charge collection efficiency may increase. The increase in resistivity of $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ and charges collection efficiency of the detector occur when there is a sufficiently high level of doping the material with aluminum.

Keywords: CdZnTe, gamma-irradiation, detectors, computer simulation, deep levels.

REFERENCES

1. Kondrik A. I. [Charges collection efficiency in gamma-ray detectors with different electrodes configuration]. *Tekhnologiya i Konstruivovanie v Elektronnoi Apparature*, 2012, no 4, pp. 47-51. (Rus)
2. Kondrik A. I. Effect of irradiation on properties of CdTe detectors. *East European Journal of Physics*, 2014, vol. 1, no 1, pp. 47-52.
3. Kondrik A. I. Influence of radiation-induced defects on CdTe and CdZnTe detectors properties. *Problems of Atomic Science and Technology, Series: Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*, 2015, vol. 96, no 2, pp. 18-24.
4. Castaldini A., Cavalini A., Fraboni B. Deep levels in CdTe and CdZnTe. *J. Appl. Phys.*, 1998, vol. 83, no 4, pp. 2121-2126.
5. Fraboni B., Pasquini L., Castaldini A., Cavallini A., Siffert P. X-ray irradiation effects on the trapping properties of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ detectors. *J. Appl. Phys.*, 2009, vol. 106, pp. 093713. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3253748>
6. Hofmann D.M., Stadler W., Christmann P., Meyer B.K. Defects in CdTe and $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1996, vol. 380, no 1-2, pp. 117-120.
7. Pavlović M., Desnica U. V., Gladić J. Complete set of deep traps in semi-insulating GaAs. *J. Appl. Phys.*, 2000, vol. 88, no 8, pp. 4563. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1308072>
8. Pavlović M., Jakšić M., Zorc H., Medunić Z. Identification of deep trap levels from thermally stimulated current spectra of semi-insulating CdZnTe detector material. *J. Appl. Phys.*, 2008, vol. 104, no 2, pp. 023525. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2959354>
9. Ruihua Nan, Wanqi Jie, Gangqiang Zha, Bei Wang, Yadong Xu, Hui Yu. Irradiation-induced defects in $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}:\text{Al}$. *Journal of Electronic Materials*, 2012, vol. 41, no 11, pp. 2044-2049. <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-012-2204-5>
10. Akutagawa W., Zanio K. Gamma response of semi-insulating material in the presence of trapping and detrapping. *J. Appl. Phys.*, 1969, vol. 40, no. 9, pp. 3838-3854. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1658281>
11. Sadullaev A.B. [Status of impurity atoms with deep levels in semiconductors in a strong compensation]. *Molodoy uchenyj*, 2011, vol. 1, no. 12, pp. 48-50. (Rus)
12. Cavallini A., Fraboni B., Dusi W., Zanarini M., Siffert P. Deep levels and compensation in γ -irradiated CdZnTe. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, vol. 77, no 20, pp. 3212-3214. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1324980>

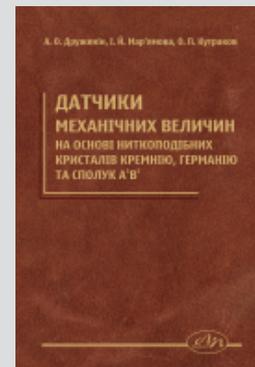
НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П. Датчики механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук A^3B^5 . — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

Проаналізовано фізичні основи створення напівпровідникових тензорезистивних датчиків механічних величин. Наведено характеристики тензорезисторів на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук A^3B^5 та результати досліджень впливу електронного опромінення на властивості ниткоподібних кристалів кремнію. Розглянуто технологічні основи виготовлення датчиків механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію для різних температурних діапазонів, а також їх конструктивні особливості. Описано датчики тиску різного призначення та їхні характеристики, а також датчики зусилля і прискорення. Розглянуто можливості створення багатофункційних датчиків для вимірювання механічних і теплових величин.

Для наукових, інженерно-технічних працівників і студентів, які навчаються за напрямом “Мікро- та наноелектроніка”, а також широкого загалу спеціалістів у галузі сенсорної електроніки та мікроелектроніки.



К. т. н. И. В. ЦЕВУХ, В. В. СПИВАК, А. И. МАЛЮТА, Т. Н. ШУБА

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: itsevukh@gmail.com

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Предложена четырехканальная система управления тепловыми режимами с пониженным уровнем электромагнитных помех, предназначенная для работы с интегральными микросхемами одно- и многоядерных центральных процессоров, графических процессоров видеокарт, чипсетов материнских плат и т. п. с плотностью выделяемого теплового потока до 200 Вт/см².

Ключевые слова: термоэлектрический модуль, широтно-импульсная модуляция, система управления, электромагнитные помехи, контроллер.

При разработке, изготовлении и эксплуатации компонентов микроэлектроники с высокой плотностью выделяемого теплового потока обязательным является их тестирование при заданных температурных режимах в соответствии с некоторой программой. Для этого могут использоваться системы термоциклирования, созданные на базе термоэлектрических модулей (ТЭМ). При формировании управляющего напряжения на ТЭМ, а следовательно и температуры объекта, можно использовать широтно-импульсную модуляцию (ШИМ), как это сделано, например, в [1]. При этом, однако, амплитуда пульсаций тока на ТЭМ может достигать десятков ампер, приводя к возникновению достаточно сильных электромагнитных помех, в том числе в непосредственной близости от ТЭМ. Это представляет серьезную проблему при тепловом тестировании материалов, чувствительных к электромагнитным волнам, или электромеханических устройств, в которых внешняя электромагнитная помеха может вызвать ложную операцию срабатывания, а также при охлаждении интегральных схем и других электронных компонентов, чувствительных к электромагнитному шуму.

В настоящей статье описана разработанная нами четырехканальная система управления тепловыми режимами (СУТР) с пониженным уровнем электромагнитных помех, предназначенная для работы с интегральными микро-

схемами (ИМС) одно- и многоядерных центральных процессоров, графических процессоров видеокарт, чипсетов материнских плат и т. п. с плотностью выделяемого теплового потока до 200 Вт/см².

Обобщенная схема СУТР при заданном температурном режиме включает в себя (рис. 1):

- термоголовки (ТГ) с установленными на них конвертерами (ТГК);
- систему управления тепловым режимом (контроллер);
- охлаждающую систему жидкостного или воздушного типа;
- персональный компьютер (ПК) для удобства задания программы и отображения результатов тестирования (опционально).

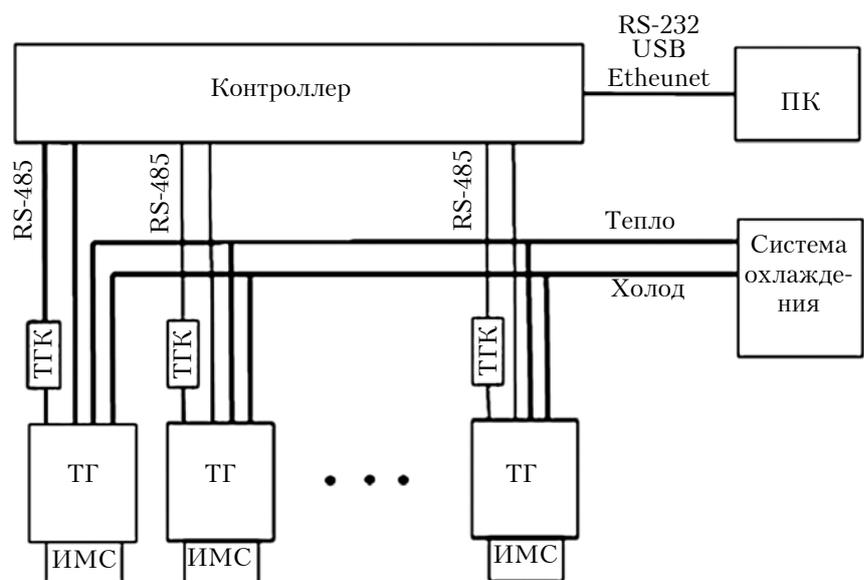


Рис. 1. Обобщенная схема СУТР

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

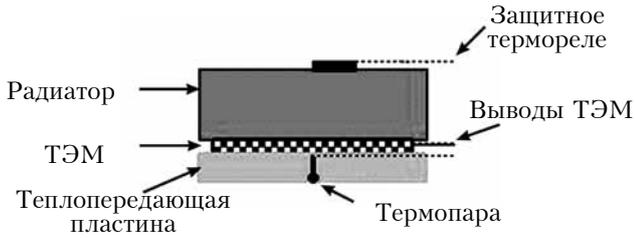


Рис. 2. Схема термоголовки

В состав разработанной СУТР может входить от одной до четырех термоголовок.

Конструкция термоголовки показана на рис. 2. Основным ее элементом является термоэлектрический модуль, который в зависимости от выделяемой мощности и заданной температуры ИМС может работать как на охлаждение, так и на нагрев, что регулируется полярностью питающего напряжения постоянного тока. Отвод тепла от тестируемой ИМС либо его подвод осуществляется нижней стороной ТЭМ через теплопередающую пластину, в центральной части которой размещена термопара. К верхней стороне ТЭМ подсоединяется радиатор (жидкостной или воздушный), который активизируется в тех случаях, когда необходимо отводить тепло.

Электронным «паспортом» термоголовки является конвертер: в его памяти хранятся все необходимые для работы характеристики, такие как параметры алгоритма регулирования, максимально допустимые значения напряжения и

тока, аварийные и предупредительные значения температуры, время наработки термоголовки и т. д. (при необходимости можно установить и сохранить в памяти конвертера новые параметры). После подключения термоголовки все они автоматически считываются контроллером, после чего система готова к работе. Связь конвертера с контроллером осуществляется через интерфейс RS-485.

В конвертере происходит преобразование поступающего с термопары аналогового сигнала в цифровой. Конвертер расположен на небольшом расстоянии от термопары, что позволяет работать со слабыми сигналами и сводит к минимуму влияние электромагнитных помех на точность измерения температуры. При этом отсутствуют ограничения на длину кабеля, соединяющего конвертер с контроллером.

Для защиты термоголовки от перегрева в конструкции предусмотрено термореле, сигнал от которого также подается в конвертер.

Информация о температуре, переданная от конвертеров в контроллер, обрабатывается в нем в соответствии со специально разработанным алгоритмом регулирования. Параметры для вычислений считываются из конвертеров. Разработанный алгоритм позволяет быстро реагировать на изменение тепловых режимов работы контролируемых объектов путем управления мощностью системы в каждом из работающих каналов в соответствии с программой тестирования.

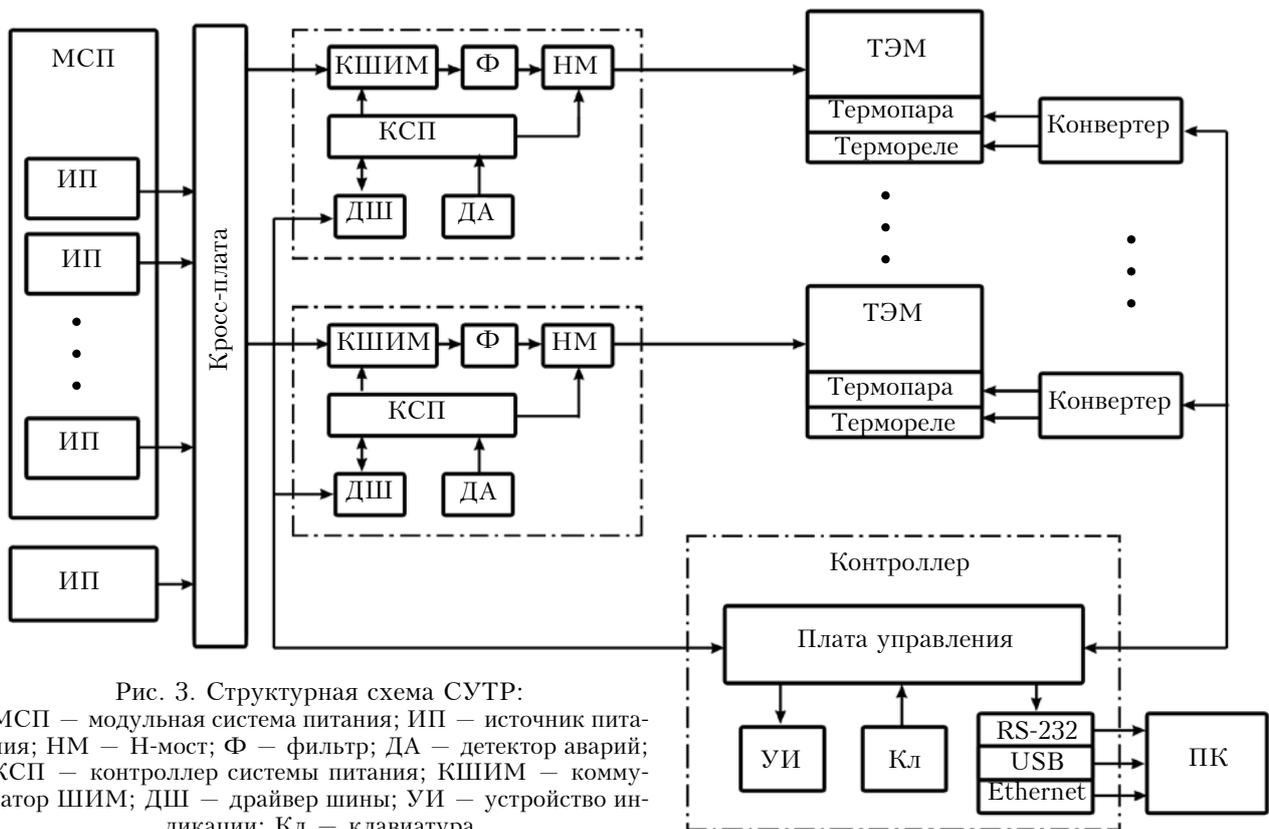


Рис. 3. Структурная схема СУТР:

МСП – модульная система питания; ИП – источник питания; НМ – H-мост; Ф – фильтр; ДА – детектор аварий; КСП – контроллер системы питания; КШИМ – коммутатор ШИМ; ДШ – драйвер шины; УИ – устройство индикации; Кл – клавиатура

Для формирования управляющего напряжения в СУТР использован метод, названный нами «ШИМ на пьедестале», который позволяет снизить уровень электромагнитных помех [2]. Вместо одного источника постоянного напряжения (ИПН), как в классическом методе ШИМ, здесь используется N последовательно включенных ИПН ($U_1=U_2=\dots=U_N=\Delta U$). В зависимости от заданной температуры объекта по специально разработанному алгоритму создается некоторое опорное напряжение, так называемый «пьедестал»: $U_{\text{П}}=n\Delta U$, где n — необходимое количество ИПН. С напряжением «пьедестала» суммируются импульсы с ШИМ амплитудой ΔU , формируя таким образом управляющее напряжение:

$$U_{\text{УПР}}(t, \Delta T) = U_{\text{П}}(\Delta T) + \Delta U \sum_{k=0}^{\infty} \text{rect} \frac{t - kt_{\text{И}}}{\tau_{\text{И}}[1 + \mu_{\text{Ш}}\beta(\Delta T)]},$$

где t — время;

ΔT — отклонение температуры объекта от заданной;

$k, t_{\text{И}}$ — соответственно, количество импульсов ШИМ и период их следования;

$\tau_{\text{И}}$ — выбранная средняя длительность прямоугольного импульса с единичной амплитудой;

$\mu_{\text{Ш}}$ — коэффициент ШИМ, определяющий девиацию продолжительности импульса;

β — информационный параметр, зависящий от ΔT .

При таком подходе уровень пульсаций напряжения может уменьшаться в N раз по сравнению с классическим методом.

Структурная схема четырехканальной СУТР приведена на **рис. 3**.

Информация о текущей температуре объекта, заданных температурах, параметрах алгоритма регулирования, управляющих напряжениях на термоголовке, измеренных значениях тока в каждом канале и еще о нескольких параметрах системы отображается на жидкокристаллическом индикаторе, расположенном на лицевой панели. Наличие такой индикации и кнопочной клавиатуры позволяет быстро и просто вводить и контролировать требуемые параметры системы.

Описанная система управления тепловыми режимами позволяет контролировать и поддерживать температуру объекта в диапазоне от -50 до 150°C с высокой скоростью реагирования на изменение теплового режима работы данного объекта. Также она может применяться в термостабах различного назначения, системах охлаждения лазеров и др.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Патент США № 7.290.395 High power thermoelectric controller / Deal Jeffrey. — 2007.

2. Цевух И. В., Спивак В. В., Малюта А. И. Метод формирования управляющего напряжения на термоэлектрических модулях // 12-я МНПК «Современные информационные и электронные технологии» («СИЭТ-2011»). — Украина, Одесса. — 2011. — С. 207.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 20.11 2015 г.*

I. V. TSEVUKH, V. V. SPIVAK, A. I. MALYUTA, T. I. SHUBA

Україна, Одеський національний політехнічний університет

E-mail: itsevukh@gmail.com

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМИ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ

Запропоновано чотирьохканальну систему управління тепловими режимами зі знизеним рівнем електромагнітних перешкод, призначену для роботи з інтегральними мікросхемами одно- і багатоядерних центральних процесорів, графічних процесорів відеокарт, чіпсетів материнських плат тощо, що виділяють тепловий потік щільністю до 200 Вт/см².

Ключові слова: термоелектричний модуль, широтно-імпульсна модуляція, система управління, електромагнітні перешкоди, контролер.

DOI: 10.15222/TKEA2016.1.20
UDC 536.58: 621.39

I. V. TSEVUKH, V. V. SPIVAK, A. I. MALYUTA, T. I. SHUBA

*Ukraine, Odessa National University
E-mail: itsevukh@gmail.com*

THERMAL MANAGEMENT SYSTEM FOR ELECTRONIC DEVICES

A four-channel thermal management system with low level of electromagnetic interference is proposed. The system is designed for single- and multi-core CPUs, GPUs, motherboard chipsets etc., emitting a heat flow with the density up to 200 W/cm².

Keywords: thermoelectric module, pulse-width modulation, control system, electromagnetic interference, controller.

REFERENCES

1. Pat. 7.290.395 USA. *High power thermoelectric controller* / Deal Jeffrey, 2007.

2. Tsevukh I.V., Spivak V.V., Malyuta A.I. [The method of generating a control voltage to the thermoelectric modules]. *12th ISPC 'Modern information and electronic technologies' ('MIET-2011')*, Ukraine, Odesa, 2011, p. 207.

К. т. н. В. Е. ТРОФИМОВ, к. т. н. А. Л. ПАВЛОВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: vovic@ukr.net

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ЖИДКОСТНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ С КАВЕРНА-ШТЫРЕВЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

Рассматривается возможность интенсификации теплопередачи в жидкостных теплообменниках с каверна-штыревым оребрением путем изменения формы каверн. Показано, что переход от круглых каверн к эллиптическим приводит не только к существенной интенсификации теплопередачи, но и позволяет уменьшить размеры и массу теплообменника.

Ключевые слова: теплообменник, каверна-штыревое оребрение, CFD-моделирование.

Современные микропроцессоры при функционировании выделяют значительное количество теплоты (порядка 150–200 Вт), и для обеспечения их оптимального теплового режима требуется применение эффективных систем охлаждения, использующих, в том числе, жидкостные теплообменники с микро- и мини-каналами различной формы и с выступами различного сечения. Проведенные ранее экспериментальные исследования и CFD-моделирование жидкостных теплообменников с каверна-штыревым оребрением, которые находят применение в испытательном оборудовании ряда производителей мощных микропроцессоров, позволили не только количественно определить преимущества оребрения такого типа, но и выявить те резервы, использование которых позволяет еще больше интенсифицировать теплопередачу в каверна-штыревой структуре. Так, в [1] было показано, что в каверна-штыревой структуре охлаждающая жидкость разделяется на два потока — прямолинейный, протекающий в зазоре между сосед-

ними рядами штырей, и волнообразный, протекающий между кавернами горячего основания теплообменника, к которому подводится тепловой поток от микропроцессора, и кавернами относительно холодной крышки (рис. 1).

В [2] было установлено, что одним из резервов интенсификации теплопередачи в каверна-штыревой структуре является всемерное усиление волнообразного течения и как можно более сильное его преобладание над прямолинейным, реализации чего посвящена настоящая работа.

Как правило, конструкция теплообменников с каверна-штыревым оребрением предусматривает форму каверн в виде круга. Однако, при всех достоинствах круглой формы каверн с точки зрения технологии изготовления теплообменника, такая структура обладает существенным недостатком — зазор между соседними рядами штырей достаточно велик при любых соотношениях размеров штырей и каверн (рис. 2), поэтому прямолинейный поток всегда превалирует над волнообразным. Очевидно, что этот зазор можно уменьшить, незначительно изменив ширину штырей в направлении, перпендикулярном течению. Это можно достичь, если кавернам придать форму, например, эллипса.

Исследование эффективности такого подхода проводилось методом CFD-моделирования с использованием системы численного моделирования Salome для создания 3D-модели, системы математического моделирования OpenFoam для решения трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса, энергии и неразрывности, а также системы ParaView для визуализации полученного решения [3, 4].

Исследование характера течения и температурного поля охлаждающей жидкости в теплообменнике при изменении формы каверн проводилось с использованием 3D-модели (рис. 3), которая имела следующие основные параметры:

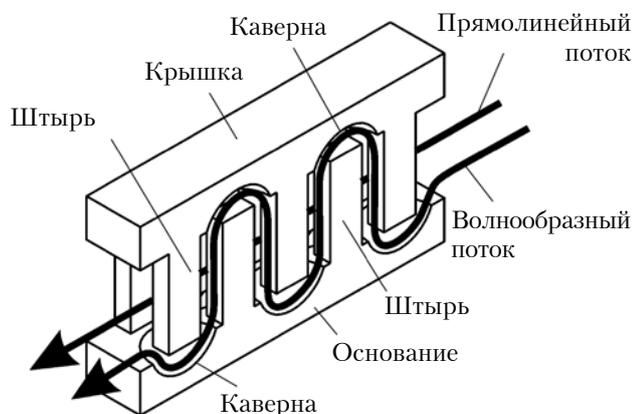


Рис. 1. Разделение потока охлаждающей жидкости в каверна-штыревой структуре

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

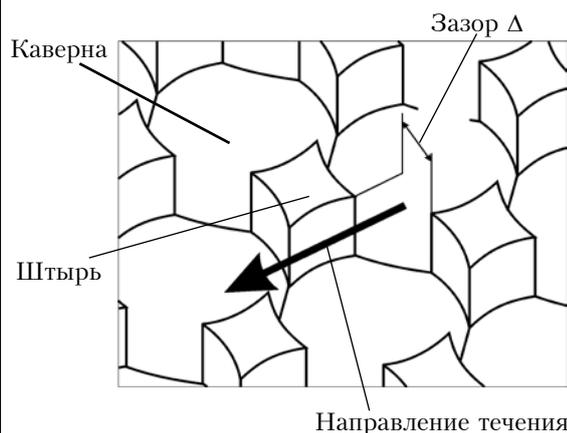


Рис. 2. Зазор между соседними рядами штырей



Рис. 3. 3D-модель теплообменника (симметричная половина)

- габаритные размеры 63,5×63,5×19,8 мм;
- диаметр входного и выходного отверстий 8,4 мм;
- материал основания и крышки теплообменника медь;
- охлаждающая жидкость вода;
- температура охлаждающей жидкости на входе в теплообменник 20°C;
- расход охлаждающей жидкости через теплообменник 0,4 – 1,0 л/мин;
- размер площадки подвода теплового потока к основанию теплообменника 29×29 мм с расположением в геометрическом центре основания;
- подводимый тепловой поток к основанию теплообменника 180 Вт.

На наружных поверхностях модели, за исключением площадки подвода теплового потока к основанию, задавались граничные условия 3-го рода с коэффициентом теплоотдачи $\alpha=10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ при температуре окружающей среды 24,6°C.

Пример расположения каверн на основании и в крышке теплообменника показан на рис. 4.

Моделирование проводилось для трех вариантов геометрии каверна-штыревой структуры: одной — с кавернами в форме круга и двух — с кавернами в форме эллипсов (табл. 1).

Для всех исследованных вариантов геометрии структур выдерживалось требование параллельности воображаемых линий, соединяющих геометрические центры каверн в одном ряду, внешним контурам теплообменника. При этом разме-

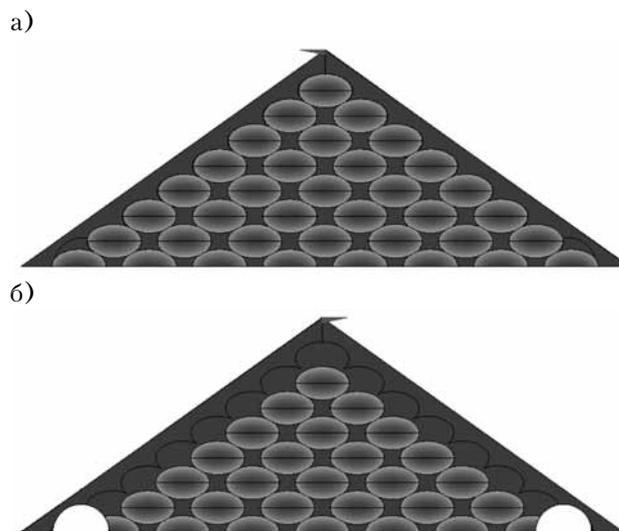


Рис. 4. Расположение каверн на основании (а) и на крышке (б)

Таблица 1

Параметры геометрии исследуемых каверна-штыревых структур

Геометрия	Размеры каверны*, мм	Размеры штыря**, мм	Зазор Δ, мм
Г_1	8/8	2,97×2,97×2,5	2,23
Г_2	8/6	3,46×2,99×2,5	1,21
Г_3	8/5	4,16×3,13×2,5	0,57

* $D_{\text{max}}/D_{\text{min}}$ — отношение большой и малой осей эллипса;

** длина×ширина×высота (длина — размер в направлении течения, ширина — поперек течения).

ры и расположение входного и выходного отверстий, а также площадки подвода теплового потока не изменялись. В результате при переходе от круглой формы каверн к эллиптической форма теплообменника в плане трансформировалась из квадратной в ромбическую, а габариты и вес уменьшились (рис. 5, табл. 2).

Результаты моделирования распределения линий тока для трех вариантов геометрии каверна-штыревой структуры приведены на рис. 6. Здесь видно, что чем больше форма каверн отличается от круглой, тем интенсивнее становится волнообразный поток и тем слабее прямолинейный.

Таблица 2

Массо-габаритные характеристики исследуемых вариантов теплообменника

Геометрия	Размер 2А (см. рис. 5), мм	Масса, г
Г_1	89,8	163
Г_2	72,5	135
Г_3	63,9	122

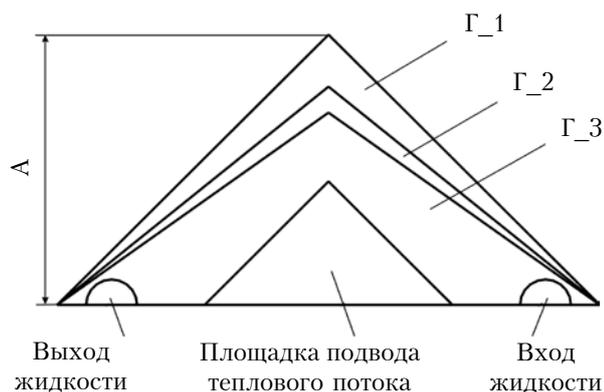


Рис. 5. Форма исследуемых вариантов теплообменника

Для анализа влияния формы каверн на гидравлические характеристики теплообменника было рассчитано тепловое сопротивление R_ϵ , а также потери давления охлаждающей жидкости H_ϵ при различной степени сжатия каверны $\epsilon = D_{\min}/D_{\max}$ (тепловое сопротивление определялось как отношение разности между максимальной температурой основания и температурой жидкости на входе в теплообменник к величине подводимого теплового потока). В табл. 3 приведены их относительные значения:

$$r_\epsilon = R_\epsilon / R_{\epsilon=1};$$

$$h_\epsilon = H_\epsilon / H_{\epsilon=1}.$$

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что:

- при изменении степени сжатия каверн от 1 до 0,625 зазор Δ между соседними рядами штырей уменьшается в 3,9 раза (см. табл. 1), при этом практически полностью исключается прямолинейное течение и резко интенсифицируется волнообразное (см. рис. 6);

- вследствие изменения характера течения охлаждающей жидкости тепловое сопротивление теплообменника уменьшается на 25% (см. табл. 3);

Таблица 3

Относительные гидравлические характеристики исследуемых вариантов теплообменника

Геометрия	ϵ	r_ϵ	h_ϵ
Г_1	1	1	1
Г_2	0,75	0,83	2,4
Г_3	0,625	0,75	7,3
Г_3*	0,625	0,75	3,7
Г_3**	0,625	0,75	4,4

* Диаметр входного и выходного отверстий увеличен с 8,4 до 10 мм;

** В основании и крышке теплообменника удалено по одному штырю возле входного и выходного отверстий.

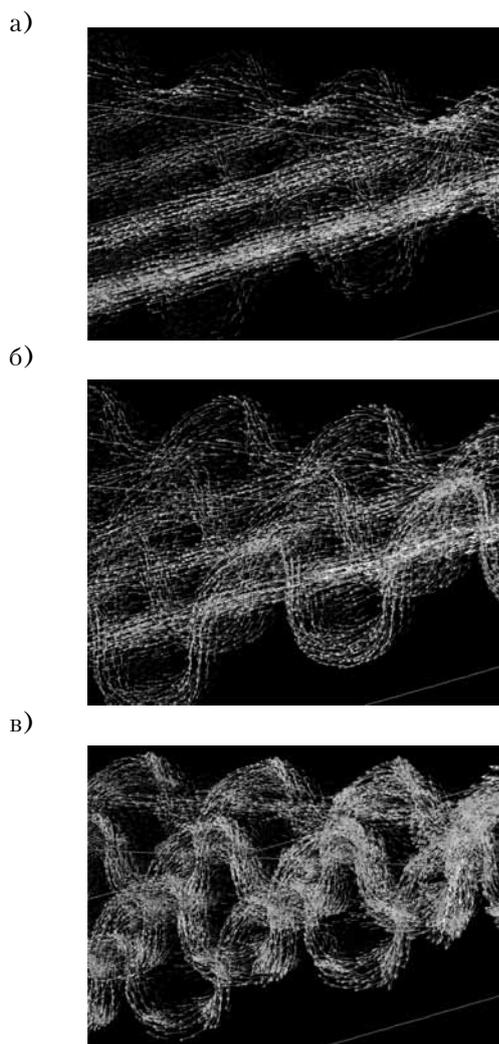


Рис. 6. Распределение линий тока в исследованных вариантах теплообменника: а – Г_1; б – Г_2; в – Г_3

- придание кавернам формы эллипса позволяет уменьшить один из габаритных размеров теплообменника в 1,4 раза и массу в 1,3 раза (см. табл. 2).

При этом необходимо отметить, что при переходе от круглой формы каверн к эллиптической и уменьшении зазора Δ гидравлическое сопротивление теплообменника вследствие очевидных причин возрастает: для геометрии Г_3 оно в 7,3 раза больше, чем для Г_1. Этот недостаток, однако, можно в какой-то мере компенсировать путем увеличения диаметра входного и выходного отверстий и оптимизации количества штырей на входном и выходном участках теплообменника. Как видно из табл. 3, при увеличении диаметра отверстий теплообменника Г_3 от 8,4 до 10 мм его гидравлическое сопротивление падает в 1,97 раза, а при удалении в основании и в крышке по одному штырю возле входного и выходного отверстий — в 1,66 раза, при этом тепловое сопротивление теплообменника не из-

меняется. Определение влияния указанных параметров на тепловые и гидравлические характеристики теплообменников в широком диапазоне их изменения требует проведения отдельного исследования.

Таким образом, исследования теплообменников с каверна-штиревым оребрением показали, что в придание кавернам формы эллипса приводит к существенной интенсификации теплопередачи, улучшению их массо-габаритных характеристик и, вместе с тем, к повышению гидравлического сопротивления, что необходимо учитывать при проектировании систем охлаждения на основе теплообменников такого типа.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Spokoyny M., Trofimov V., Qiu X., Kerner J. M. Enhanced heat transfer in a channel with combined structure of pins and dimples // Proc. 9th AIAA/ASME

Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. — San Francisco, CA. — 2006. — 21 p.

2. Спокойный М. Ю., Трофимов В. Е., Шевчук М. В. CFD-моделирование теплообмена в прямоугольном канале с каверна-штиревым оребрением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2013. — № 2-3. — С. 33–38.

3. Трофимов В. Е., Павлов А. Л. Анимация взаимодействия встречных струй в радиаторе для жидкостного охлаждения микропроцессора // Тр. XV МНПК «СИЭТ-2014». — Украина, г. Одесса. — 2014. — С. 26–27.

4. Трофимов В. Е., Павлов А. Л., Жмуд Е. В. Визуализация взаимодействия струи с тупиковой полостью радиатора для жидкостного охлаждения микропроцессора // Тр. XVI МНПК «СИЭТ-2015». — Украина, г. Одесса. — 2015. — С. 160–161.

Дата поступления рукописи
в редакцию 18.12 2015 г.

В. Є. ТРОФІМОВ, О. Л. ПАВЛОВ

Україна, Одеський національний політехнічний університет
E-mail: vovic@ukr.net

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В РІДИННИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ З КАВЕРНА-ШТИРЬОВИМ ОРЕБРЕННЯМ

Розглядається можливість інтенсифікації теплопередачі в рідинних теплообмінниках з каверна-штиревим оребренням шляхом зміни форми каверн. Показано, що перехід від круглих каверн до еліптичних призводить не тільки до суттєвої інтенсифікації теплопередачі, але й дозволяє зменшити розміри і масу теплообмінника.

Ключові слова: теплообмінник, каверна-штиреове оребрення, CFD-моделювання.

DOI: 10.15222/ТКЕА2016.1.23
UDC 536.24

V. Ye. TROFIMOV, A. L. PAVLOV

Ukraine, Odessa National Polytechnic University
E-mail: vovic@ukr.net

INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER IN LIQUID HEAT EXCHANGERS WITH DIMPLE-PIN FINNING

The authors consider the possibility of intensification of heat transfer in fluid heat exchangers with cavity-pin finning by changing the shape of the cavities. It is shown that the transition from circular to elliptic cavities leads not only to a significant intensification of heat transfer but also reduces the size and weight of the heat exchanger.

Keywords: heat exchanger, cavity-pin finning, CFD modeling.

REFERENCES

1. Spokoyny M., Trofimov V., Qiu X., Kerner J.M. Enhanced heat transfer in a channel with combined structure of pins and dimples. Proc. 9th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, San Francisco, CA, 2006, 21 p.

2. Spokoyny M. Yu., Trofimov V. E., Shevchuk M. V. [CFD modeling of heat transfer in a rectangular channel with dimplepin finning]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparatyure*, 2013, no.2-3, pp. 33-38. (Rus)

3. Trofimov V. Ye., Pavlov A. L. [Animation of contrary jets interaction in the radiator for microprocessor liquid cooling]. Proc. of XV ISPC "MIET-2014", Ukraine, Odessa, 2014, pp. 26-27. (Rus)

4. Trofimov V. Ye., Pavlov A. L., Zhmud E. [Visualization of Jets Interaction in the Deadlock Cavity Radiator for Microprocessor Liquid Cooling]. Proc. of XV ISPC "MIET-2015", Ukraine, Odessa, 2015, pp. 160-161. (Rus).

В. С. ПОПУКАЙЛО

Республика Молдова, г. Тирасполь, Приднестровский государственный университет им. Т. Г. Шевченко
E-mail: vsp.science@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ В ПАРНЫХ ВЫБОРКАХ МАЛОГО ОБЪЕМА

Рассмотрены методы нахождения значений линейной корреляционной связи в парных выборках малого объема. Исследовано влияние процедур виртуального увеличения объема выборки на значение коэффициента корреляции Пирсона, а также возможности использования этого коэффициента и модифицированного индекса Фехнера после применения метода точечных распределений и построения таблиц двумерного виртуального распределения. Сделан вывод, что рассмотренные методы не дают требуемой точности на выборках малого объема, а применение «бутстреппинга» и метода точечных распределений при проведении корреляционного анализа не рекомендуется.

Ключевые слова: малая выборка, корреляционный анализ, коэффициент корреляции Пирсона, модифицированный индекс Фехнера, метод точечных распределений.

При решении задач контроля качества микронизированных изделий большой интерес представляет задача проверки гипотезы о значимости корреляционной связи между случайными величинами, т. е. значимости отклонения коэффициента корреляции от нуля. Это обусловлено тем, что определение коэффициента связи при отборе факторов позволяет существенно сократить количество отбраковочных контрольных операций при сохранении качества изделия. Коэффициент корреляции при этом показывает, насколько связь между случайными величинами близка к линейной.

При применении корреляционного анализа к исходной информации предъявляются определенные требования, а именно: число наблюдений или объектов должно быть достаточно большим, а исходные данные — однородными, т. е. отражать наиболее характерные черты изучаемой совокупности. Кроме того, данные должны быть выражены количественно и измерены достаточно точно. Однако в задачах технического контроля не всегда можно получить достаточно большой набор данных для проведения анализа. Например, при производстве кристаллов интегральных микросхем из-за специфики топологии на пластине имеется от 5 до 10 тестовых ячеек, измерения в которых должны с некоторой вероятностью отражать поведение одноименных параметров 400–5000 рабочих кристаллов [1]. Проблема объема выборки при исследовании коэффициента корреляции поднимается различными исследователями [2–4], существует ряд методов повышения точности расчета коэффициента корреляции в условиях ограниченного набора данных, однако оптимально-

го метода нахождения значения корреляционной связи для выборок малого объема (3–20 элементов) на данный момент не предложено.

Целью настоящей работы является исследование меры тесноты связи и выработка методологии определения силы линейной корреляционной связи в малых парных выборках.

Важнейшими эмпирическими мерами тесноты линейной взаимосвязи количественных, равноценных в независимых наблюдениях переменных являются коэффициент парной корреляции Пирсона и коэффициент прямой корреляции знаков Фехнера.

Наиболее точной мерой линейной корреляционной связи является коэффициент корреляции Пирсона, рассчитанный по парной выборке достаточно большого объема, которая распределена по нормальному закону и не содержит грубых промахов. При несоблюдении хотя бы одного из этих условий величина коэффициента корреляции может значительно отличаться от реальной [2]. Поэтому применение коэффициента Пирсона не дает приемлемых результатов при малых выборках, поскольку в этих случаях невозможно точно определить вид закона распределения и обнаружить грубые промахи, однако, несмотря на это, он используется при анализе малых выборок [5].

Коэффициент Фехнера — это оценка степени согласованности направлений отклонений индивидуальных значений факторного и результативного признаков от их средних значений. Преимуществами использования этого коэффициента являются простота его вычисления и более низкая зависимость от вида закона распределения и от наличия в выборке грубых прома-

хов. Однако точность оценки при этом хуже, чем при использовании коэффициента корреляции Пирсона, а относительное совпадение этих коэффициентов наблюдается только при значениях, больших 0,8. Этот недостаток существенно уменьшается, если использовать модифицированный индекс Фехнера (МИФ) [6], однако его применение при малом числе наблюдений не представляется возможным.

Для повышения точности определения коэффициентов корреляции предлагается применить метод точечных распределений (МТР) [7] с построением таблицы двумерного виртуального распределения. Алгоритм расчета рассмотрим на конкретном числовом примере.

Пусть дана парная выборка объемом $n=10$, полученная на основании данных производства кристаллов интегральных микросхем (табл. 1)

Согласно методу точечных распределений каждое i -е значение выборки считается центром виртуального распределения с заданным законом распределения.

Для создания корреляционной таблицы необходимо сначала определить границы существова-

зом получается 10 групп интервалов дискретности. Следующим шагом формируется таблица, в столбцах которой располагаются центры 10 групп интервалов, а в строках — экспериментальные значения соответствующей выборки. В ячейку, находящуюся на пересечении центра группы и исходного значения рассматриваемой выборки, заносится число, соответствующее условию накрывания интервалов задания для данной выборки. Таким образом формируются таблицы для обеих выборок X и Y (табл. 2, 3).

Затем следует сформировать таблицу двумерного распределения (основа — метод Чебышева), клетки которой заполняются по формуле

$$d_{jl} = \sum_{i=1}^n n_{ji}n_{li} \quad (1)$$

где n — объем первоначальной парной выборки; n_{jl}, n_{li} — данные ячеек табл. 2 и 3 соответственно.

Результаты двумерного виртуального распределения представлены в табл. 4.

Исследование связи между двумя случайными величинами начнем с вычисления смешанного центрального момента первого порядка:

$$\begin{aligned} \mu_{1/1} &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k (X_j - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})n_{ji} = \\ &= \frac{19922,9}{818,106} = 24,3525. \end{aligned} \quad (2)$$

Смешанный основной момент первого порядка является коэффициентом корреляции и находится следующим образом:

$$r_{1/1} = \frac{\mu_{1/1}}{S_X S_Y} = \frac{24,3525}{42,8364} = 0,5685, \quad (3)$$

где S_X и S_Y — среднеквадратические отклонения, $S_X = 10,00146$, $S_Y = 4,28302$.

Для расчета индекса Фехнера необходимо вычислить таблицу знаков отклонения $\text{sign}(X_i - X_{cp})$ и $\text{sign}(Y_i - Y_{cp})$. Количество пар отклонений, совпадающих по знаку, обозначим как v , а не совпадающих — как w .

Далее найдем модифицированный индекс Фехнера, используя формулу

$$f^* = \pm \sqrt{\frac{|v-w|}{v+w}} \pm 0,051, \quad (4)$$

где знак «+» берется при $v > w$, знак «-» — при $v < w$.

Определим число пар совпадающих и не совпадающих знаков отклонения от среднего в таблице двумерного виртуального распределения. Для этого подсчитаем суммы n_{ji} чисел, которые стоят в ячейках на пересечении совпадающих и не совпадающих знаков отклонения величин X и Y соответственно. Решив эту задачу, получим $v=589,041$, $w=229,065$, и тогда в соот-

Таблица 1

Исходная парная выборка

i	X_i	Y_i
1	247,03	206,15
2	231,19	200,78
3	223,24	199,38
4	221,70	193,02
5	238,64	200,11
6	240,42	207,82
7	237,47	201,29
8	227,54	198,47
9	220,44	197,87
10	240,07	202,10

ния выборок каждого параметра (a_X, b_X и a_Y, b_Y), а также интервалов перекрытия каждого ядра ($\pm pX$ и $\pm pY$) с одновременным выбором вида ядра, коэффициента p' и количества интервалов дискретности каждого отрезка (a, b).

В результате расчетов получено: $p'=0,36962$; $a_X=210,619$; $b_X=254,929$; $p_X=16,3778$; $a_Y=190,682$; $b_Y=210,716$; $p_Y=7,40454$.

Каждый отрезок (a, b) следует разбить на 30 интервалов дискретности и найти центры для каждого интервала. Затем определяется условие накрывания каждой i -й дельтаобразной функции интервалом задания $\pm p$ каждого центра j -го интервала дискретности.

Частоты средних интервалов дискретности следует объединить по три, и таким обра-

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Таблица 2

Суммарные виртуальные частоты для выборки случайной величины X

		247,03	231,19	223,24	221,70	238,64	240,42	237,47	227,54	220,44	240,07	n_j	$X_j \cdot n_j$	$X_j^2 \cdot n_j$
1	212,83	0,00	0,01	0,52	0,83	0,00	0,00	0,00	0,09	1,16	0,00	2,62	557,67	118690,72
2	217,27	0,00	0,13	1,66	2,14	0,00	0,00	0,00	0,54	2,49	0,00	6,97	1513,93	328924,97
3	221,70	0,00	0,69	2,82	2,93	0,03	0,01	0,05	1,70	2,86	0,01	11,10	2461,00	545595,63
4	226,13	0,00	1,94	2,56	2,14	0,24	0,11	0,37	2,84	1,75	0,13	12,09	2733,92	618215,24
5	230,56	0,04	2,91	1,24	0,84	1,03	0,62	1,37	2,53	0,57	0,69	11,83	2728,45	629066,72
6	234,99	0,29	2,33	0,32	0,17	2,37	1,83	2,65	1,21	0,10	1,94	13,20	3102,51	729058,27
7	239,42	1,16	0,99	0,04	0,02	2,90	2,88	2,76	0,31	0,01	2,91	13,98	3346,53	801227,18
8	243,85	2,49	0,23	0,00	0,00	1,90	2,43	1,53	0,04	0,00	2,33	10,95	2669,03	650846,85
9	248,28	2,86	0,03	0,00	0,00	0,66	1,09	0,45	0,00	0,00	1,00	6,09	1511,43	375260,56
10	252,71	1,75	0,00	0,00	0,00	0,12	0,26	0,07	0,00	0,00	0,23	2,43	614,67	153336,11
	Σ	8,59	9,26	9,17	9,07	9,25	9,23	9,26	9,26	8,94	9,24	91,26	21239,14	4952222,26

Таблица 3

Суммарные виртуальные частоты для выборки случайной величины Y

		206,15	200,78	199,38	193,02	200,11	207,82	201,29	198,47	197,87	202,10	n_l	$Y_l \cdot n_l$	$Y_l^2 \cdot n_l$
1	191,68	0,00	0,00	0,03	2,55	0,01	0,00	0,00	0,08	0,15	0,00	2,82	540,54	103613,40
2	193,69	0,00	0,06	0,23	2,83	0,12	0,00	0,03	0,49	0,75	0,01	4,51	873,78	169241,16
3	195,69	0,00	0,39	1,01	1,68	0,64	0,00	0,25	1,60	2,02	0,12	7,70	1507,02	294910,03
4	197,69	0,01	1,39	2,34	0,53	1,86	0,00	1,07	2,79	2,92	0,64	13,56	2679,93	529805,91
5	199,70	0,11	2,67	2,91	0,09	2,89	0,02	2,40	2,60	2,26	1,87	17,81	3556,70	710263,21
6	201,70	0,62	2,74	1,92	0,01	2,40	0,16	2,89	1,30	0,93	2,89	15,86	3198,85	645209,42
7	203,70	1,83	1,50	0,68	0,00	1,07	0,78	1,86	0,34	0,20	2,39	10,66	2171,50	442342,20
8	205,71	2,88	0,44	0,13	0,00	0,25	2,07	0,64	0,05	0,02	1,06	7,54	1550,21	318888,98
9	207,71	2,42	0,07	0,01	0,00	0,03	2,93	0,12	0,00	0,00	0,25	5,83	1210,87	251510,08
10	209,71	1,08	0,01	0,00	0,00	0,00	2,21	0,01	0,00	0,00	0,03	3,35	702,24	147268,92
	Σ	8,97	9,26	9,26	7,68	9,26	8,16	9,26	9,26	9,26	9,26	89,63	17991,63	3613053,32

Таблица 4

Таблица двумерного виртуального распределения

		191,68	193,69	195,69	197,69	199,70	201,70	203,70	205,71	207,71	209,71	n_l	$X_j - X_{cp}$	$Y_j - Y_{cp}$
1	212,83	2,32	3,39	4,42	5,33	4,48	2,24	0,64	0,10	0,01	0,00	22,93	-19,90	-9,04
2	217,27	5,90	8,56	11,22	14,00	12,40	6,60	2,03	0,36	0,04	0,00	61,12	-15,47	-7,04
3	221,70	8,10	11,94	16,55	22,33	21,40	12,46	4,29	0,89	0,14	0,03	98,13	-11,04	-5,04
4	226,13	6,02	9,49	15,26	23,80	25,99	17,62	7,35	2,03	0,59	0,27	108,44	-6,61	-3,03
5	230,56	2,48	4,65	10,07	19,96	26,90	22,72	12,04	4,82	2,49	1,47	107,59	-2,18	-1,03
6	234,99	0,61	1,74	6,05	16,21	27,42	28,08	18,19	10,07	7,08	4,47	119,92	2,25	0,97
7	239,42	0,12	0,73	3,85	12,58	24,20	27,72	21,18	15,32	12,45	7,77	125,92	6,69	2,98
8	243,85	0,03	0,33	2,03	7,11	14,54	18,32	17,26	16,22	13,96	8,17	97,97	11,12	4,98
9	248,28	0,01	0,11	0,67	2,43	5,28	7,81	10,06	12,01	10,43	5,55	54,35	15,55	6,98
10	252,71	0,00	0,02	0,12	0,47	1,16	2,29	4,22	5,90	5,06	2,48	21,73	19,98	8,99
	n_j	25,58	40,98	70,24	124,23	163,77	145,87	97,26	67,73	52,25	30,21	818,11	-	-

ветствии с формулой (4) величина МИФ в этом случае будет равна

$$f^* = 0,71433. \quad (5)$$

Таким образом, были обработаны более ста парных выборок с коэффициентом корреляции от 0,1 до 1.

Результаты проделанной работы представлены на рис. 1—4, где изображены линии тренда, аппроксимируемые по двум точкам, по оси X располагаются значения коэффициентов корреляции Пирсона по первоначальной выборке большого объема ($r^б$), по оси Y: на рис. 1 — значения коэффициента корреляции Пирсона по выборке малого объема ($r^м$), на рис. 2 — наивероятнейшего коэффициента корреляции после применения «бутстрепинга» ($r_{бтс}$), на рис. 3 — коэффициента корреляции Пирсона по выборке малого объема после применения метода точечных распределений ($r_{мтр}^м$), на рис. 4 — моди-

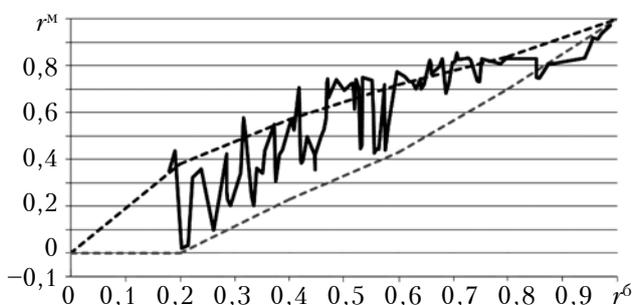


Рис. 1. Коэффициент корреляции Пирсона по малой выборке

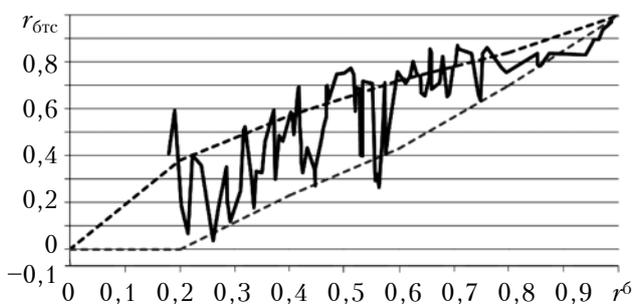


Рис. 2. Наивероятнейший коэффициент корреляции после применения «бутстрепинга»

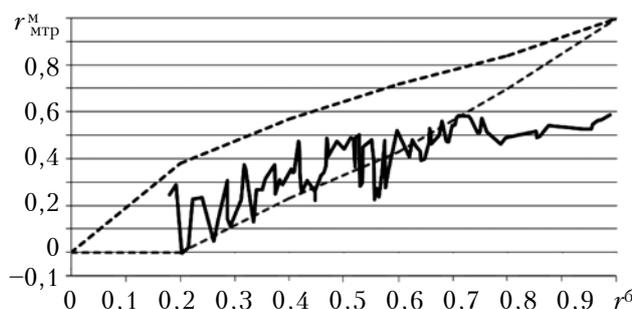


Рис. 3. Коэффициент корреляции Пирсона после применения МТР

фицированного индекса Фехнера после применения метода точечных распределений ($f_{мтр}^*$). Пунктирными линиями на графиках обозначены доверительные интервалы для коэффициента корреляции, полученного по первоначальной выборке [8, с. 250].

Для оценки силы связи в теории корреляции применяется шкала Чеддока: слабая — от 0,1 до 0,3; умеренная — от 0,3 до 0,5; заметная — от 0,5 до 0,7; высокая — от 0,7 до 0,9; весьма высокая (сильная) — от 0,9 до 1,0.

Как видно из рис. 1, практически все случаи, когда коэффициент корреляции Пирсона, рассчитанный по малой выборке, показывает слабую или умеренную корреляционную связь, действительно являются выборками с данными видами связей. Также этот критерий почти безошибочно указывает на высокую и весьма высокую (сильную) связь. Однако в тех случаях, когда $0,5 < r < 0,75$, наблюдается заметная тенденция к завышению значения коэффициента корреляции. Кроме того, разброс значений коэффициентов корреляции до $r=0,6$ в первоначальной выборке большого объема приводит к довольно большому разбросу при определении связи по парной выборке объемом $n=10$.

Процедура «бутстрепинга» не дает улучшения результата, а только увеличивает разброс получаемых значений коэффициента корреляции при общем сохранении тренда (рис. 2).

Из рис. 3 видно, что после применения метода точечных распределений тенденция в изменении значений коэффициента корреляции сохраняется, их разброс значительно снижается, однако в случаях заметной и более тесных связей явно преобладает тенденция к значительному снижению значения коэффициента корреляции, что не позволяет успешно использовать данный метод на практике. Необходимо разработать дополнительный поправочный коэффициент, который учтет обнаруженный недостаток.

Применение модифицированного индекса Фехнера после метода точечных распределений (рис. 4) при значениях первоначального коэффициента корреляции до 0,3 также дает на выходе большой разброс, который даже увеличивается по сравнению с разбросом при нахождении коэффициента корреляции Пирсона по ма-

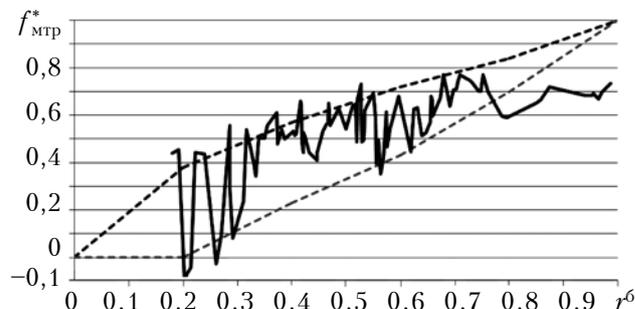


Рис. 4. Модифицированный индекс Фехнера после применения МТР

лой выборке. Однако при более высоких значениях r (от 0,3 до 0,75) разброс значительно уменьшается, что приводит к тому, что почти все значения попадают в доверительный интервал. Недостатком данного метода, таким образом, является невозможность определить сильную линейную связь между выборками малого объема.

Выводы

Проведенное исследование показало, что при решении задач корреляционного анализа применительно к выборкам малого объема ни один из рассмотренных коэффициентов не дает результаты, которые с высокой степенью надежности позволяют устанавливать вид линейной корреляционной связи между величинами. Применение процедур виртуального увеличения количества исследуемой информации, таких как «бутстрепинг» и метод точечных распределений, не увеличивают точности при нахождении наивероятнейшего коэффициента корреляции Пирсона. Расчет модифицированного индекса Фехнера после применения метода точечных распределений дает удовлетворительные результаты для разграничения слабой и высокой связей, однако не позволяет определить сильную корреляционную связь. К тому же, в задачах контроля качества микроэлектронной продукции применение данного метода вместо нахождения коэффициента Пирсона по классическому методу не рекомендуется в связи с относительно высокой его трудоемкостью.

Направлением дальнейших исследований должно стать определение оптимального мето-

да нахождения корреляционной связи по выборкам малого объема.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Столяренко Ю. А. Контроль кристаллов интегральных схем на основе статистического моделирования методом точечных распределений / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Москва: ГУП НПЦ «СПУРТ», 2006.
2. Goodwin L.D., Leech N.L. Understanding correlation: factors that affect the size of r // The Journal of Experimental Education. — 2006. — Vol. 74, iss. 3. — P. 249–266. <http://dx.doi.org/10.3200/JEXE.74.3.249-266>
3. De Winter J.C.F. Using the Student's t-test with extremely small sample sizes. — Practical Assessment, Research & Evaluation. — 2013. — Vol. 18, N 10. — <http://pareonline.net/getvn.asp?v=18&n=10>
4. Moinester M., Gottfried R. Sample size estimation for correlation with pre-specified confidence interval // The Quantitative Methods for Psychology. — 2014. — Vol. 10, N 2. — P. 124–130.
5. Сухорученков Б.И. Анализ малой выборки. Прикладные статистические методы. — Москва: Вузовская книга, 2010.
6. Долгов А. Ю. Повышение эффективности статистических методов контроля и управления технологическими процессами изготовления микросхем / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Тирасполь: Приднестровский гос. ун-т им. Т. Г. Шевченко, 2000.
7. Столяренко Ю. А. Метод точечных распределений // Радиоэлектронные и компьютерные системы. — 2012. — № 6. — С. 75–77.
8. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. — Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983.

Дата поступления рукописи
в редакцию 30.11 2015 г.

В. С. ПОПУКАЙЛО

Республіка Молдова, м. Тираспіль, Придністровський державний університет ім. Т. Г. Шевченко
E-mail: vsp.science@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНОГО КОРЕЛЯЦІЙНОГО ЗВ'ЯЗКУ В ПАРНИХ ВИБІРКАХ МАЛОГО ОБСЯГУ

Розглянуто методи знаходження значень лінійного кореляційного зв'язку в парних вибірках малого обсягу. Досліджено вплив процедур віртуального збільшення обсягу вибірки на значення коефіцієнта кореляції Пирсона, а також можливості використання цього коефіцієнта та модифікованого індексу Фехнера після застосування методу точкових розподілів і побудови таблиць двовимірного віртуального розподілу. Зроблено висновок, що розглянуті методи не дають необхідної точності на вибірках малого обсягу, а застосування «бутстрепінга» і методу точкових розподілів при проведенні кореляційного аналізу не рекомендується.

Ключові слова: мала вибірка, кореляційний аналіз, коефіцієнт кореляції Пирсона, модифікований індекс Фехнера, метод точкових розподілів.

DOI: 10.15222/TKEA2016.1.27
UDC 519.25

V. S. POPUKAYLO

Moldova, Tiraspol, Shevchenko Transnistria State University
E-mail: vsp.science@gmail.com

THE LINEAR CORRELATION RESEARCH IN PAIRED SMALL VOLUME SAMPLES

This article describes the methods of finding the values of the linear correlation in paired small volume samples. The importance of the study lies in the fact that in problems of technical control it is not always possible to

obtain a data set sufficiently large for traditional analysis methods. In this research the author investigates and visually illustrates the possibility of Pearson correlation coefficient usage (and the impact on the value of the virtual procedures increasing the volume sample), as well as the possibility of the Fechner's modified index usage after applying the method of pointed distributions and tabulation of the virtual two-dimensional distribution. The study allows concluding that the considered methods do not provide the required accuracy on small volume samples, and the usage of "bootstrapping" and the method of point distributions during the correlation analysis are not recommended here.

Keywords: small volume samples, correlation analysis, method of point allocations, Pearson correlation coefficient, Fechner's modified index.

REFERENCES

1. Stolyarenko Yu.A. [The crystals control of integrated schemes on the basis of statistical modeling by pointed distributions method]. *Dissertation abstract*. Moskow, SUE NPTs "SPURT", 2006. (Rus)
2. Goodwin L.D., Leech N.L. Understanding Correlation: Factors That Affect the Size of r . *The Journal of Experimental Education*, 2006, vol. 74, iss. 3, pp. 249-266. <http://dx.doi.org/10.3200/JEXE.74.3.249-266>
3. J.C.F. de Winter. Using the Student's t-test with extremely small sample sizes. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 2013, vol. 18, no. 10. <http://pareonline.net/getvn.asp?v=18&n=10>
4. Moinester M., Gottfried R. Sample size estimation for correlation with pre-specified confidence interval. *The Quantitative Methods for Psychology*, 2014, vol. 10, no. 2, pp. 124-130.
5. Sukhoruchenkov B.I. *Analiz maloi vyborki* [Small sample analysis. Applied statistical methods]. Moskow, Vuzovskaya kniga, 2010, 384 p. (Rus)
6. Dolgov A.Yu. [The efficiency of statistical control and management methods of technological chips production processes]. *Dissertation abstract*. Tiraspol, Pridnestrovien state university of T. G. Shevchenko, 2000. (Rus)
7. Stolyarenko Y.A. [Method of point allocations]. *Electronic and computer systems*, 2012, no.6, pp. 75-77. (Rus)
8. Bol'shev L.N., Smirnov N.V. *Tablitsy matematicheskoi statistiki* [Mathematical Statistics Tables]. Moskow, Nauka, 1983, 416 p. (Rus)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Матвійків М. Д., Вус Б. С., Матвійків О. М. Елементи та компоненти електронних пристроїв.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

Викладено основні відомості про сучасні та перспективні елементи і компоненти електронних пристроїв, зокрема наведено визначення різних видів елементів та компонентів, розглянуто їх призначення, класифікацію, умовні зображення і позначення, будову, роботу, властивості, застосування.

Для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом "Радіоелектронні апарати", та фахівців, які проектують, виготовляють або обслуговують різноманітні електронні апарати, зокрема аудіо- та відеотехніку, електронні обчислювальні машини, мікропроцесори та персональні комп'ютери, медичні апарати, засоби зв'язку, контрольно-вимірювальні прилади, робототехніку, автоматизовані системи проектування та управління тощо.



НОВЫЕ КНИГИ



Баришніков Г. В., Волинюк Д. Ю., Гельжинський І. І., Готра З. Ю., Мінаєв Б. П., Стахіра П. Й., Черпак В. В. Органічна електроніка.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

Наведено основні постулати квантової механіки для органічної електроніки. Описано базові структури та особливості функціонування нанорозмірних елементів, пристроїв електронної техніки: сонячних фотоелементів, світловипромінювальних структур, транзисторних структур, сенсорів тощо. Розглянуто фізико-хімічні основи технології створення електронних структур органічної електроніки.

Для студентів та аспірантів, які навчаються за напрямом електроніки.



К. т. н. А. Н. ТЫНЫНКА

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: lorans53@mail.ru

АЛГОРИТМ ВЫБОРА ИНТЕРВАЛА ПЕРЕСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ В АСУ ТП

Разработан алгоритм выбора интервала измерений и корректировки параметров объектов контроля и управления иерархических АСУ, укомплектованных разнообразными техническими средствами и средствами связи между компонентами. Допустимый по точности воспроизведения характеристик объектов интервал определяется на основе теоремы Котельникова. Алгоритм предлагается использовать как универсальную последовательность действий при реализации различных способов достижения оптимального управления. Показана возможность использования алгоритма при управлении динамическими объектами с прогнозирующими моделями.

Ключевые слова: АСУ ТП, интервал контроля параметров объектов, алгоритм выбора интервала, теорема Котельникова, прогнозирующие модели.

При синтезе оптимальной системы управления объектами в основном решаются две задачи: определение оптимального управления (оптимального управляющего сигнала) и реализация оптимальных регуляторов, более сложной из которых является первая.

Оптимальное управление может быть получено в двух видах: в виде оптимальной программы и в виде оптимальной стратегии, когда управление задается как функция фазовых координат и входного сигнала, система управления является замкнутой, сохраняются все достоинства системы, построенной по принципу обратной связи. Второй вид совершеннее — реальная траектория движения ближе к оптимальной. В любом случае, для повышения качества системы управления требуется периодическое измерение параметров объектов управления, а потому частью оптимизации автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) является выбор интервала измерений. Однако, несмотря на важность этой проблемы, в литературе ей не уделяется достаточное внимания (см., например [1–4]).

В настоящей работе предложен алгоритм выбора интервала измерений и корректировки параметров объектов контроля и управления иерархических АСУ.

Постановка общей задачи

Основой для оптимизации управления и для удачной компоновки АСУ ТП техническими средствами являются свойства объектов управления, выявленные в результате анализа режимов работы технологических машин на их моделях. Пусть математической моделью объекта

управления служит система обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений вида

$$y'(t) = f[t, y(t), u(t)], \quad (1)$$

где t — время, $t \in [0, \infty]$;

u — вектор управления, $u \in U^m$;

y — вектор состояния из векторного (фазового) пространства Y^n системы управления (1), $y \in Y^n$.

Каждому вектору y в фазовом пространстве соответствует некоторая фазовая точка. Систему уравнений (1) можно решить, если задан вектор $u(t)$ и начальное условие $y(t_0)$. Поскольку разным вектор-функциям $u(t)$ соответствуют различные решения $y(t)$ уравнений (1), движением системы можно управлять, выбирая вектор $u(t)$.

Решению $y(t)$, $t_0 \leq t \leq t_1$, в фазовом пространстве Y соответствует фазовая траектория системы. Положим, что для любых кусочно-непрерывных функций $u(t)$ со значениями из множества U функция $f[t, y(t), u(t)]$ удовлетворяет условиям существования и единственности решения задачи Коши для системы (1). Кроме того, будем полагать $f(t, 0, 0) \equiv 0$, т. е. система (1) обладает нулевым положением равновесия.

Целью управления объектом является обеспечение выполнения равенств

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - r_y(t)| &= 0; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - r_u(t)| &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где заданные векторные функции $r_y(t)$ и $r_u(t)$ определяют некоторое желаемое движение объекта.

Любая задача оптимального управления состоит в поиске такого управляющего воздействия

из некоторого доступного класса, которое обеспечивало бы достижение цели функционирования объекта управления, описываемого моделью (1), с учетом ограничения $y(t) \in Y^n$ для $\forall t \in [0, \infty]$, а также, если ввести в рассмотрение понятие качества управления, — минимум функционала $J_0 = J_0 [y(t), u(t)]$.

В настоящее время известны многочисленные варианты типовых задач, например [1, 2, 5], конкретизирующих приведенную выше общую формулировку, а также разнообразные подходы к их аналитическому и численному решению. Однако необходимо отметить, что все эти подходы являются достаточно сложными для практической реализации.

Возможности упрощения модели

Одной из важнейших причин, затрудняющих практическое использование классических оптимизационных подходов при создании систем управления сложными объектами, является то, что математическая модель (1), которая исчерпывающим образом должна представлять динамику реального объекта, в силу различных обстоятельств не известна и в принципе не может быть построена. К таким обстоятельствам относятся неучтенные нелинейности, внешние воздействия (помехи), вариации параметров, неучтенная дополнительная динамика и т. д. Даже если модель (1) в известной мере отражает все эти факторы, в процессе функционирования некоторые из них могут изменяться, причем эти изменения априори не известны.

Итак, любая фиксированная математическая модель вида (1), с одной стороны, лишь приближенно представляет реальный объект, а с другой, является слишком сложной для практической реализации управления в реальном времени. Это оправдывает замену ее более простой моделью, которая в силу определенной близости к объекту при любых вариациях неучтенных факторов позволила бы выработать приближенные управляющие воздействия.

В [6] показано, что на верхних иерархических уровнях систем управления технологическими процессами в качестве эталона можно использовать линеаризованные модели технологических машин, агрегатов и установок как объектов контроля и управления (ОКУ), но их параметры должны идентифицироваться и адаптироваться с периодичностью, которая бы не ухудшала эффективность формирования управляющих воздействий.

Процессы наблюдаются в моменты $t_k, k = 1, 2, \dots$. Аргументом в моделях ОКУ будет интервал между замерами. В течение времени наблюдения $T = kt$ в иерархических системах автоматического контроля, регулирования и управления ОКУ должны быть решены следующие задачи:

1) прием информации от датчиков, установленных на ОКУ;

2) идентификация параметров математических моделей;

3) вычисление оценок наблюдаемых координат математических моделей;

4) принятие решений по управлению отдельными ОКУ и технологическим процессом в целом;

5) расчет оптимальных управляющих сигналов для отдельных ОКУ.

В общем случае интервал подбирается индивидуально для каждого ОКУ из некоторого диапазона, где верхнее значение определяется допустимой ошибкой воспроизведения сигнала.

Частота пересчетов параметров дискретных моделей зависит от численного значения τ , а оно, в свою очередь, определяется такими факторами, как характеристики ОКУ по измеряемым сигналам, быстродействие датчиков, частота возмущений, расстояние от ОКУ до управляющего вычислительного комплекса и тип канала связи между ними, характеристики помех, искажающих полезные сигналы.

В результате измерения сигналов ОКУ формируется вектор $y(k\tau)$. Допустимый по точности воспроизведения координат вектора y интервал τ определяется на основе теоремы Котельникова [7], в соответствии с которой функция с ограниченным спектром может быть представлена рядом

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} f(k\tau) \frac{\sin \omega_c (t - k\tau)}{\omega_c (t - k\tau)},$$

коэффициенты которого представляют собой отсчеты значений функции, взятые через $\tau = \pi / \omega_c = 1 / (2f_c)$, где ω_c, f_c — частота, ограничивающая спектр.

Числами, определяющими функцию с ограниченным спектром, могут быть не только отсчеты ее мгновенных значений, но и другие независимые числа, в качестве которых логично использовать коэффициенты разложения функции в ряд Фурье.

Если передавать числа равномерно, то для полного определения функции на интервале наблюдения T потребуется $m = 2f_c T$ чисел, а временной интервал между двумя числами будет равен $\tau = T / m$.

При этом необходимо иметь в виду, что в большинстве случаев даже при автоматическом управлении технологическими машинами мы сталкиваемся с процессами, имеющими начало и конец, т. е. с функциями ограниченной длительности, которые не могут иметь ограниченный спектр (спектральную плотность, равную нулю вне конечного интервала) — эти условия противоречивы. Однако, если считать ширину спектра F как интервал частот, вне которого спектральная плотность меньше некоторой выбранной величины (спектр быстро убывает за пределом F), то общий смысл теоремы Котельникова, состоящий в том, что функция определяется на

интервале T посредством $m=2FT$ отсчетов, сохраняется [7].

В то же время, если частота импульсов f_0 , модулирующих непрерывный сигнал, удовлетворяет условию $f_0 \geq f_c$ и спектр сигнала f существует (не обрезается) в диапазоне $0 \leq f \leq (f_0 - f_c)$, то подобная дискретная система может анализироваться и проектироваться с помощью методов проектирования непрерывных систем автоматизированного контроля и управления [6].

Часто возмущение многих объектов, задействованных в технологическом процессе и управлении им, имеет нормальный закон распределения. В таких случаях можно предположить, что в некотором приближении процессы в ОКУ, вторичные по отношению к основному возмущению, тоже распределены нормально. Тогда для решения задач выбора оборудования и контроля его работы применимы методы корреляционной и спектральной теорий.

Положения теоремы Котельникова позволяют предварительно оценить случайный сигнал $y(k\tau)$, интервал его измерений τ , приемлемую точность воспроизведения сигнала σ , минимальную длину реализации T_{\min} и m выборочных значений из нее (k — номер точки на временном отрезке анализа динамики процесса; $k\tau$ — момент времени оценки и измерения) [8].

Описание алгоритма

В процессе работы с ОКУ значения τ , T и m могут корректироваться по предлагаемому алгоритму (см. рисунок), основанному на вычислении корреляционных и спектральных функций на базе измеренных данных. Оптимальная величина τ определяется по критерию минимума суммарной ошибки σ .

Последовательность выполнения алгоритма следующая (номера шагов соответствуют нумерации блоков на рисунке).

1. В соответствии с теоремой Котельникова по априорным данным ОКУ определяются предварительные значения τ для сигнала $y_k(t)$.

2. По априорным данным определяются отношения амплитуд помехи и сигнала в полосе пропускаемых частот и интенсивность нормальных флуктуационных помех [9].

3. Выбирается предварительное значение $T > 5/f_c$.

4. Проверяется гипотеза об однородности измеренных данных на разных интервалах τ в пределах T [10]. (Неоднородные «порции» данных могли образоваться за счет неодинаковых условий их регистрации во времени или пространстве.) С этой целью сравниваются значения σ_k^2 при разных k . Если различие статистически значимо, данные заменяются порцией новых измерений (блок 4а на рисунке), если нет — переход к шагу 5.

5. Матрица измеренных данных проверяется на полноту заполнения. Если в ней отсутствует значение какого-либо признака ОКУ, связанное

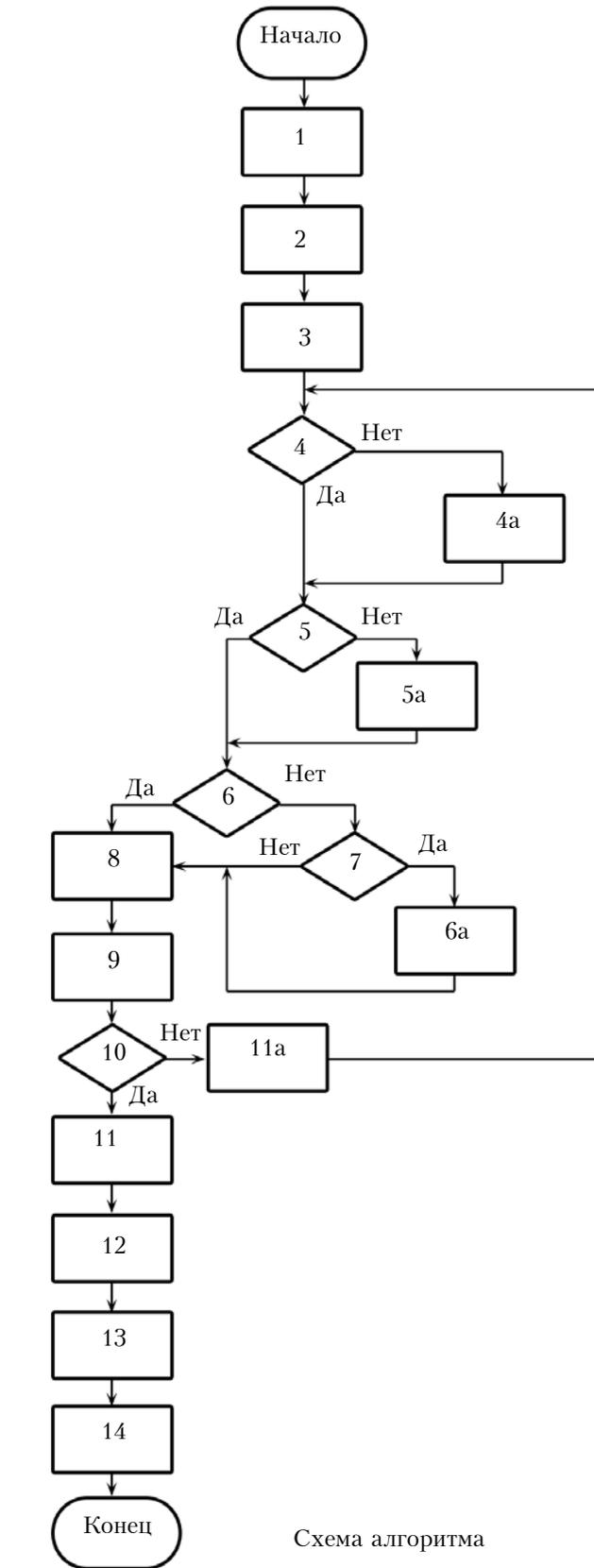


Схема алгоритма

не с состоянием самого ОКУ, а с другими техническими причинами, например с неисправностью датчика, то вместо него принимается среднее арифметическое значение, которое опреде-

ляется по имеющимся реализациям (блок 5а). Если матрица заполнена полностью — переход к шагу 6.

6. Проверяется статистическая значимость отличия резко выделяющихся величин от основной массы данных. Составляется вариационный ряд из результатов замеров. Решающее правило для исключения экстремального члена вариационного ряда основано на статистике $\Phi_k = (y_k - \bar{y}) / \sigma$, где \bar{y} и σ определяются обычным образом. Статистика Φ_k сравнивается с критическими значениями, приведенными в [11].

7. Проверяется гипотеза о нормальном законе распределения. Если распределение признака нормально, резко выделяющиеся значения удаляются из массива данных (блок 6а), если нет — переход к шагу 8.

8. Вычисляются значения корреляционной функции r_y измеряемого сигнала ОКУ на интервале наблюдения T с помощью алгоритма [8] для стационарных сигналов, построенного на основании эргодической теоремы.

9. Вычисляется интервал корреляции по формуле [12]

$$\tau_{\text{кор}} \cong \int_0^T |r_{yi}(t)| dt \cong \sum_{k=1}^m |r_{yi}(t_k)|, \quad (3)$$

где m — количество вычисленных значений корреляционной функции.

10. Проверяется неравенство $|r_y(t_m)| \leq \eta$, где η — малая положительная величина, определяющая допустимую погрешность замены точного значения корреляционной функции $r_y(t)$ ее приближенным значением $r_y(t_k)$ в выражении (3). Обычно $\eta=0,05$ [12]. Если неравенство не выполняется, то следует увеличить T в 2–3 раза (блок 11а) и вернуться к шагу 4, если выполняется — переход к шагу 11.

11. Корректируется величина τ в соответствии с величиной интервала корреляции.

12. Определяется максимальная частота спектра $\omega_c \cong \pi / 2\tau_{\text{кор}}$ для анализа спектральной функции сигнала.

13. Оценивается относительная среднеквадратичная ошибка воспроизведения $y_k(t)$ [12] в соответствии с неравенством

$$\sigma_b^2 \leq 3E_c / E_T, \quad (4)$$

где E_c — энергия части спектра за пределами ω_c ;

E_T — общая энергия процесса $y(t)$, выделяющаяся за время T :

$$E_T = \int_0^T y^2(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty |S_T(\omega)|^2 d\omega.$$

(Неравенство (4) справедливо при быстром убывании величины спектральных функций

$$S_T(\omega) = \int_0^T y(t) e^{-j\omega t} dt \text{ и при небольших } m.$$

Мощность за время T составит величину

$$P_T = \frac{1}{\pi T} \int_0^\infty |S_T(\omega)|^2 d\omega, \text{ которая зависит от } T \text{ при малых } T, \text{ но для стационарного процесса стремится с ростом } T \text{ к постоянному пределу.)}$$

14. Вычисляется суммарная среднеквадратическая ошибка, зависящая от интервала τ и складывающаяся из ошибки от нормальной помехи и ошибки воспроизведения $y_k(t)$.

Реализация рассмотренного алгоритма усложняет структуру АСУ ТП, но повышает точность контроля и управления.

Обоснованно выбранный интервал дискретности позволяет приступить к формированию дискретного аналога модели объекта управления, описываемого системой уравнений (1), в координатах пространства состояний на верхнем уровне управления АСУ ТП. Последующие задачи, связанные с характеристиками, свойствами и ограничениями ОКУ, могут быть решены в рамках исследования полученной математической модели на управляемость, наблюдаемость, устойчивость, чувствительность. После этого можно перейти к выбору оборудования АСУ ТП по заранее сформированным критериям.

Управление с предсказанием

Для того чтобы приблизить траекторию движения ОКУ к оптимальной, можно использовать прогнозирующие модели управления (MPC-методы, model predictive control) [13], построенные по принципу обратной связи, согласно которому при формировании управляющего воздействия используется измеряемая информация о состоянии объекта, и система управления является замкнутой.

В случае управления с предсказанием прогнозирующая модель активизируется в определенные моменты времени при соответствующем состоянии объекта, что позволяет приближенно спрогнозировать его поведение (прогнозирование с подвижным горизонтом). Информации о состоянии объекта поступает в моменты $0, \tau, 2\tau, \dots$

Таким образом, вместо (1) рассматриваем систему дифференциальных уравнений

$$\tilde{y}'(\tau) = \tilde{f}[\tau, \tilde{y}(\tau), \tilde{u}(\tau)], \tilde{y}|_{\tau=t} = y(t). \quad (5)$$

Кроме того, будем считать, что функция \tilde{f} задана таким образом, что для любого допустимого управления $\tilde{u}(\tau) \equiv u(\tau)$ векторные функции $y(\tau)$ в системе (1) и $\tilde{y}(\tau)$ в (5) близки между собой для любого $\tau \in [t, \infty]$. В остальном функция \tilde{f} обладает такими же свойствами, что и функция f , а векторы \tilde{y} и \tilde{u} принимают значения из тех же допустимых множеств Y и U .

Система дифференциальных уравнений (5) является прогнозирующей моделью. Прогнозирующую модель желательно выбирать достаточно простой, чтобы ее можно было интегри-

ровать в масштабе реального времени и непосредственно использовать в контуре управления. Полученное частное решение $\tilde{y} = \tilde{y}[\tau, \tilde{y}(t), \tilde{u}(t)]$ будет трактоваться как предсказанное поведение ОКУ с горизонтом управления, зависящим от τ . Следует отметить, что реальная траектория объекта в целом будет отличаться от прогнозируемой на любом отрезке реальной длины, а совпадение гарантируется только в начальной точке.

Простейшим частным примером прогнозирующей модели можно считать какой-либо асимптотический «наблюдатель», сформированный для системы (1), которая тоже линеаризована, но только в окрестности своего нулевого положения равновесия при некотором номинальном сочетании факторов неопределенности.

Применимость алгоритма

Реализация лишь однократного прогноза приводит к значительным отклонениям от оптимальной траектории, поэтому необходимо выполнять многократный прогноз с одним и тем же интервалом времени τ , что должно защитить от потери информации, содержащейся в векторе $y(t)$. Сигнал управления изменяется через интервал τ в результате каждого нового прогноза. Вырабатывать прогнозы и менять сигналы чаще нет необходимости.

Таким образом, интервал τ становится универсальным интервалом замеров значений функции (1) при разных методах оптимизации управляющих сигналов $u(t)$. Определить его величину можно по приведенному выше алгоритму.

После нахождения τ процесс управления с предсказанием происходит следующим образом. Решается оптимизационная задача для прогнозирующей модели (5) с начальным условием $\tilde{y}|_{t=\tau} = y(t)$ по отношению к функционалу, оценивающему качество процесса управления прогнозирующей моделью. Найденная оптимальная функция $\tilde{u}^*[\tau, y(t)]$ используется для программного управления на отрезке $\tau \in [t, t+\tau]$. Далее момент времени t заменяется на $t+\tau$ и повторяются предыдущие действия.

Поскольку случайные возмущения (они накладываются на фазовое пространство) и шумы измерения μ_t (они искажают функцию наблюдения $\varphi_t = by_t + \mu_t$) имеют нормальное распределение, алгоритм оптимального прогнозирования поведения объекта и вектора выхода можно синтезировать, используя экстраполятор Калмана [14].

Систематизируем основные особенности предложенного подхода управления с предсказанием.

1. В качестве прогнозирующей модели можно использовать нелинейные системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

2. Предложенный подход позволяет учитывать ограничения, которые наложены как на управляющие переменные, так и на компоненты вектора состояния.

3. Для управления с предсказанием необходимо, чтобы текущее состояние объекта непосредственно измерялось или оценивалось.

4. Предложенный подход предусматривает минимизацию функционала, характеризующего качество процесса управления, в режиме реального времени. Для работы в масштабе реального времени необходимо, чтобы решение оптимизационной задачи осуществлялось достаточно быстро, в пределах допустимого запаздывания. Следует отметить, что для решения оптимизационной задачи численными методами удобно пользоваться, например, существующим пакетом прикладных программ MPCTools [15].

5. Предсказанная траектория движения динамического объекта в общем случае будет отличаться от реальной.

6. Непосредственная реализация обсуждаемой схемы MPC-стратегии не гарантирует устойчивости по Ляпунову движения объекта, что требует принятия специальных мер по ее обеспечению.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет устанавливать интервалы измерения и коррекции параметров моделей объекта контроля и управления, используя корреляционные и спектральные функции, и может применяться при различных способах оптимизации управления, в том числе по схеме MPC-стратегии.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. — С.-Пб.: Профессия, 2003.
2. Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовской В. Д. Теоретические основы автоматизированного управления. — Москва: Высш. школа, 2006.
3. Солодовников В. В., Плотников В. Н., Яковлев А. В. Теория автоматического управления техническими системами. — Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1993.
4. Методы классической и современной теории автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. — Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
5. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. — Москва: Горячая линия-Телеком, 2009.
6. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. — Москва: Наука, 1987.
7. Анохин В. А. Применение теории Котельникова в условиях компьютерно-интегрированных технологических систем производства // Вестник Сибирского ГАКУ им. акад. М. Ф. Решетникова. — 2008. — № 4. — С. 9–12.
8. Фельдбаум А. А., Дудыкин А. Д., Мановцев А. П. и др. Теоретические основы связи и управления. — Москва: Физматгиз, 1963.
9. Ильин В. А. Телеуправление и телеизмерение. — Москва: Энергия, 1974.
10. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. — Москва: Финансы и статистика, 1983.
11. Большев А. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. — Москва: Наука, 1965.
12. Романенко А. Ф., Сергеев Г. А. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. — Москва: Советское радио, 1968.
13. Camacho E. F., Bordons C. Model predictive control. — London: Springer – Verlag, 2004.
14. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана — Бьюси. — Москва: Наука, 1972.
15. www.mathworks.com/programs

Дата поступления рукописи
в редакцию 15.12.2015 г.

АЛГОРИТМ ВИБОРУ ІНТЕРВАЛУ ПЕРЕРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ
ОБ'ЄКТІВ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ В АСУ ТП

Розроблено алгоритм вибору інтервалу вимірювань і коригування параметрів об'єктів контролю та управління ієрархічних АСУ, укомплектованих різноманітними технічними засобами і засобами зв'язку між компонентами. Допустимий по точності відтворення характеристик об'єктів інтервал визначається на основі теореми Котельникова. Алгоритм пропонується використовувати як універсальну послідовність дій при реалізації різних способів досягнення оптимального управління. Показано можливість використання алгоритму при управлінні динамічними об'єктами з прогнозувальними моделями.

Ключові слова: АСУ ТП, інтервал контролю параметрів об'єктів, алгоритм вибору інтервалу, теорема Котельникова, прогнозуючі моделі.

DOI: 10.15222/ТКЕА2016.1.33
UDC 681.51:621.391

A. N. TYNUNYKA

Ukraine, Odessa National Polytechnic University
E-mail: lorans53@mail.ru

THE ALGORITHM FOR SELECTION OF INTERVAL OF PARAMETERS
RECALCULATION OF CONTROL AND MANAGEMENT OBJECTS
IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF PROCESS ENGINEERING

The author presents an algorithm for selecting of measurements and adjusting interval of parameters of control and management objects of hierarchical ACS, packaged with a variety of technical equipment and means of communication between the components. The interval that is acceptable for fidelity of reproduction of characteristics of objects is determined using Kotelnikov theorem. The algorithm is proposed to be used as a universal sequence of actions in the implementation of the various ways to achieve optimal control. The paper shows the possibility of using the algorithm in the management of dynamic objects with predictive models.

Keywords: automatic control system of process engineering, control interval of objects parameters, interval selection algorithm, Kotelnikov theorem, predictive models.

REFERENCES

1. Besekerskii V. A., Popov E. P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control system theory]. SPb, Professiya, 2003. (Rus)
2. Sovetov B. Ya., Tsekhanovskii V. V., Chertovskoi V. D. *Teoreticheskie osnovy avtomatizirovannogo upravleniya* [Theoretical bases of automatic control]. Moscow, VSh, 2006. (Rus)
3. Solodovnikov V. V., Plotnikov V.N., Yakovlev A.V. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya tekhnicheskimi sistemami* [Automatic control theory of technical systems]. Moscow, BMSTU, 1993. (Rus)
4. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classic and modern automatic control theory]. Ed. by K. A. Pupkov and N. D. Egupov. Moscow, BMSTU, 2004. (Rus)
5. Denisenko V. V. *Komp'yuternoe upravlenie tekhnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniem* [Computer control of technological process, experiment, equipment]. Moscow, Goryachaya liniya-Telecom, 2009. (Rus)
6. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* [A handbook on automatic control theory]. Ed. by A. A. Krasovskiy. Moscow, Nauka, 1987. (Rus)
7. Anokhin V. A. *Primenenie teorem Kotel'nikova v usloviyakh komp'yuterno-integrirovannykh tekhnologicheskikh sistem proizvodstva* [Sampling theorems of Kotelnikov application in conditions of computer-integrated manufacturing systems]. *Vestnik of SibSAU* 2008, no. 4. (Rus)
8. Fel'dbaum A. A., Dudykin A.D., Manovtsev A.P. et al. *Teoreticheskie osnovy svyazi i upravleniya* [Theoretical bases of communication and control]. Moscow, Physmathgiz, 1963. (Rus)
9. П'їн V. A. *Teleupravlenie i teleizmerenie* [Telemechanical control and measurement]. Moscow, Energia, 1974. (Rus)
10. Aivazyan S. A., Enyukov I. S., Meshalkin L. D. *Prikladnaya statistika: Osnovy modelirovaniya i pervichnaya obrabotka dannykh* [Applied Statistics: Bases of modelling and initial data processing. Reference edition]. Moscow, Finansy i statistika, 1983. (Rus)
11. Bol'shev A. N., Smirnov N. V. *Tablitsy matematicheskoi statistiki* [Tables of mathematical statistics]. Moscow: Nauka, 1965. (Rus)
12. Romanenko A. F., Sergeev G. A. *Voprosy prikladnogo analiza sluchainykh protsessov* [Applied analysis of casual process]. Moscow: Sovradio, 1968. (Rus)
13. Camacho E. F., Bordons C. *Model predictive control*. London, Springer – Verlag, 2004.
14. Brammer K., Ziffing G. *Fil'tr Kalmana – B'yusi* [Kalman – Byusi's filter]. Moscow, Nauka, 1972. (Rus)
15. www.mathworks.com/programs

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

Баранов Валентин Владимирович, докт. техн. наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск

Ижнин Игорь Иванович, докт. физ.-мат. наук, начальник лаборатории, НПП «Карат», г. Львов

Ковалюк Захар Дмитриевич, докт. физ.-мат. наук, руководитель Черновицкого отделения Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ

Корбутяк Дмитрий Васильевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев

Кравец Владимир Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, НТУУ «Киевский политехнический институт»

Максименко Юрий Николаевич, канд. техн. наук, зам. директора, ЧАО «Украналит», г. Киев

Николаенко Юрий Егорович, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НТУУ «Киевский политехнический институт»

Синотин Анатолий Мефодьевич, докт. техн. наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Ситников Валерий Степанович, докт. техн. наук, профессор, Одесский национальный политехнический университет

Трофимов Владимир Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет

Уваров Борис Михайлович, докт. техн. наук, профессор, НТУУ «Киевский политехнический институт»

Цымбал Александр Михайлович, докт. техн. наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2015 г.

Новые компоненты для электронной аппаратуры

Массивы нанопроводов из антимонида индия для перспективных термоэлектрических устройств. *Г. Г. Горох, И. А. Обухов, А. А. Лозовенко.* 1

Электронные средства: исследования, разработки

Пассивные ограничители иммитанса. *Н. А. Филинюк, Л. Б. Лищинская, Р. Ю. Чехместрук* 2–3

Оптимизация расположения межслойных переходов на группе проводников. *К. А. Кноп, С. Ю. Лузин* 2–3

Тепловой мониторинг как метод оценки технического состояния цифровых радиоэлектронных систем. *Ю. Н. Лаврич* 4

Устройство для бесконтактного экспресс-измерения параметров термоэлектрических материалов. *А. А. Ащеулов, И. А. Бучковский, И. С. Романюк* 4

Оптимизация комплексного показателя надежности радиотехнических устройств путем изменения их топологии. *Б. М. Уваров, Ю. Ф. Зиньковский* 5–6

Анализ несущих конструкций 19-дюймовой и метрической систем для электронных средств. *А. А. Ефименко, А. П. Карлангач* 5–6

СВЧ-техника

Алгоритм синтеза линейных антенных решеток с требуемой диаграммой направленности и целочисленными амплитудными коэффициентами. *А. В. Садченко, О. А. Кушниненко, А. В. Троянский* 2–3

Полупроводниковый генератор импульсного действия с электронным переключением частот Ка-диапазона. *В. П. Дворниченко, Н. Ф. Карушкин, В. В. Малышко, В. А. Ореховский* 4

Радиометрический приемный комплекс и пути снижения вносимой им погрешности в радиометрические измерения. *А. М. Пилипенко, И. К. Сундучков, В. В. Чмиль, В. М. Чмиль, П. А. Яцык* 5–6

Системы передачи и обработки сигналов

Физиологические аспекты проектирования систем скрытой передачи информации на оптическом излучении видимого диапазона.

В. В. Браиловский, М. Г. Рождественская, И. В. Пислар, О. В. Пошак 1

Влияние нелинейных эффектов на спектральную эффективность многоходовых антенных систем. *Ю. В. Вишнякова* 4

Исследование влияния шумов на работу зарядочувствительного усилителя с компенсацией пирозлектрической помехи. *В. И. Старцев, А. А. Анисимов, А. С. Руссу* 4

Исследование объемных акустических волн СВЧ-диапазона, возбужденных встречно-штыревым преобразователем. *А. Г. Решотка, В. Г. Гайдучок, Н. М. Вакив* 5–6

Энергетическая электроника

Анализ энергетических процессов в импульсных преобразователях электрической энергии переменного тока. *А. Ф. Кадацкий, А. П. Русу* 1

Моделирование характеристик тандемного монолитного солнечного элемента Si/Ge с буферным слоем $Si_{1-x}Ge_x$. *А. Б. Гниленко, Ю. Н. Лаврич, С. В. Плаксин* 5–6

Сенсоэлектроника

Моделирование отклика CdZnTe- и TlBr-детекторов для регистрации смешанного бета- и гамма-излучения. *А. И. Скрыпник* 1

Оперативный контроль состояния акустических сенсорных сетей. *В. А. Болтенков, Г. Х. М. Аль-Джасри* 2–3

Датчик гидростатического давления на основе микрокристаллов антимонида галлия. *А. А. Дружинин, И. И. Марьямова, А. П. Кутраков, Н. С. Лях-Кагуй* 4

Функциональная микро- и наноэлектроника

Исследование удельного сопротивления омических контактов Au—Ti—Pd—*n*-Si для лавинно-пролетных диодов. *В. В. Басанец, В. С. Слепокуров, В. В. Шинкаренко, Р. Я. Кудрик, Я. Я. Кудрик* 1

Высокочувствительный фотоприемник на основе германиевой двухбарьерной структуры с эффектом смыкания. *О. А. Абдулхаев, Д. М. Ёдгорова, А. В. Каримов, Ш. М. Кулиев* 4

Обеспечение тепловых режимов

Влияние эффективности исходных материалов на показатели надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Часть I: Однокаскадные ТЭУ. *В. П. Зайков, В. И. Мещеряков, А. А. Гнатовская, Ю. И. Журавлев*

1

Применение тепловых труб в системах обеспечения тепловых режимов РЭА: современное состояние и перспективы. *С. М. Хайрнасов*

2–3

Влияние эффективности исходных материалов на показатели надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Часть 2: Двухкаскадные ТЭУ. *В. П. Зайков, В. И. Мещеряков, Ю. И. Журавлев*

2–3

Охлаждение светодиодного модуля с помощью различных теплоотводов. *А. Н. Наумова, Ю. Е. Николаенко, В. Ю. Кравец, В. М. Сорокин, А. С. Олейник*

5–6

Технологические процессы и оборудование

Статистический анализ и оптимизация параметров технологии изготовления биполярного транзистора с изолированным затвором. *В. В. Баранов, А. М. Боровик, И. Ю. Ловшенко, В. Р. Стемпицкий, Чан Туан Чунг, Ибрагим Шелибак*

1

Формирование нанопленок Cu, Ag, Au под воздействием атомов водорода. *Е. Л. Жавжаров, В. М. Матюшин*

5–6

Материалы электроники

Осаждение пленок борофосфоросиликатного стекла с использованием системы ТЭОС-диметилфосфит-триметилборат. *А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко* (на английском языке)

1

Структура полимерных композитов на основе диоксида ванадия и их диэлектрические свойства в диапазоне радиочастот. *В. Р. Колбунов, А. С. Тонкошкур, Е. В. Антонова*

2–3

Исследование кристаллов $Cu_2ZnSnTe_4$ и гетеропереходов на их основе. *Т. Т. Ковалюк, М. Н. Солован, А. И. Мостовой, Э. В. Майструк, Г. П. Пархоменко, П. Д. Марьянчук*

5–6

Влияние отжига на ВАХ гетероперехода $n-ZnO-p-InSe$. *З. Д. Ковалюк, В. Н. Катеринчук, З. Р. Кудринский, Б. В. Кушнир, В. В. Нетяга, В. В. Хомяк*

5–6

Метрология. Стандартизация

Проблемы при измерениях интегральной чувствительности фотоприемников и некоторые пути их решения. *И. В. Докторович, В. Н. Годованюк, В. Г. Юрьев, В. Г. Житарюк*

2–3

Использование метода импедансной спектроскопии для анализа бензольного топлива. *А. Л. Кукла, А. В. Мамыкин, А. С. Майстренко, Е. В. Полункин, Л. И. Старжинская*

2–3

Обеспечение точности аппроксимации R/T-характеристики NTC-термистора на основе нейросетевого моделирования. *С. С. Федин, И. С. Зубрецкая*

4

Расчет характеристик рентгеновских установок. *А. Н. Оробинский*

5–6

Способ аналитического определения координат источника излучения в однородной среде. *Е. В. Величко*

5–6

Библиография

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2014 г.

1

EIT'16

International Conference on Electronics and Information Technology

Odesa Ukraine
2016 May 23—27



Organized by



Odessa National
Polytechnic University
opu@opu.ua
<http://opu.ua/>



Scientific Research Company
"Carat"
office@carat.electron.ua
<http://en.carat.electron.ua>



Scientific-Production
Enterprise "Saturn"
chmil@nbi.com.ua
<http://www.jssaturn.com>



"Politehperiodika" PE
tkea@optima.com.ua

<http://www.tkea.com.ua/english/>



IEEE Ukraine Section
section@ieee.org.ua
<http://ieee.org.ua>

Conference Topics

Topic 1. Electronic Devices and Systems

Industrial electronics and control instrumentation. Design and construction of the electronic devices. Thermal management and reliability of the electronic devices and systems. Computer-aided design systems. Structural materials. Metrology and standardization.

Topic 2. Micro- and Nanoelectronics

Functional micro- and nanoelectronics. Opto- and acousto-electronics. Sensors. Materials for micro- and nanoelectronics. Technological processes for production of the electronic components.

Topic 3. Signal Processing and Telecommunications

Radio and television electronic devices and systems. Radiolocation systems. Signal transmission and processing. Crypto- and steganography. Information security control.

Topic 4. Computer Systems and Information Technology

Software engineering. Information technology. Artificial intelligence systems. Parallel, distributed and reconfigurable computer systems. Computer, embedded and robotic systems. Automation and computer integrated technologies.

<http://www.tkea.com.ua/eit/index.html>





Выставочный центр КиевЭкспоПлаза
Украина, Киев ул. Салютная, 2-Б
Тел.: + 380 44 461-95-85

http://expoua.all.biz/kieveyspoplaza-vystavochnyj-centr-by_venues21?page=2

19 — 22 апреля 2016 г. МЕЖДУНАРОДНЫЕ ВЫСТАВКИ



- ЭНЕРГЕТИКА
- ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
- ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

www.elcom.ua

Тематические направления



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Высоковольтная аппаратура, низковольтная аппаратура, энергосбережение, охрана труда в электроэнергетике.



СИСТЕМЫ ЭНЕРГОБЕСПЕЧЕНИЯ И ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Когенерационные установки, электростанции, стабилизаторы, преобразователи, инверторы, выпрямители, аккумуляторы, источники бесперебойного питания, электрощитовое оборудование, системы электропитания, электроприборы и преобразователи, системы заземления и молниезащиты.



КАБЕЛЬНО-ПРОВОДНИКОВАЯ ПРОДУКЦИЯ

Кабели, провода, кабеленесущие системы, электромонтажные изделия, оборудование для монтажа и прокладки.



СВЕТОТЕХНИКА

Техническое освещение, декоративное освещение, LED-освещение, источники света.

www.asutp.euroindex.ua



**электроника
и промышленная
автоматизация**

Тематические направления

Электроника

микропроцессоры и микроконтроллеры, активные компоненты, пассивные компоненты, силовая электроника, источники питания, датчики, ВЧ- и СВЧ-компоненты, дисплеи и светодиодная продукция, печатные платы и контрактное производство, полупроводниковые компоненты и устройства, электромеханические компоненты и технологии соединений

Промышленная автоматизация

АСУП, АСУ ТП, АСДУ, АСКУЭ, АСПР, Системы контроля технологических параметров, САПР, SCADA-системы, MES-системы, промышленное программное обеспечение, промышленные компьютеры, интеграция и консалтинг

Контрольно-измерительные приборы

электроизмерительные приборы, радиоизмерительные приборы, генераторы сигналов, приборы контроля и управления, измерители, преобразователи, средства контроля технических параметров, метрологическое оборудование, делители, датчики, автоматика, блоки питания, уровнемеры, расходомеры

*Номер готовили
Киев, Львов, Минск, Одесса,
Тирасполь, Харьков, Черновцы*



Пишите
Подписывайтесь
Читайте