

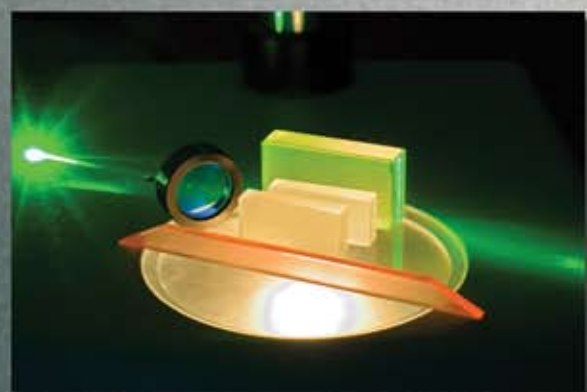
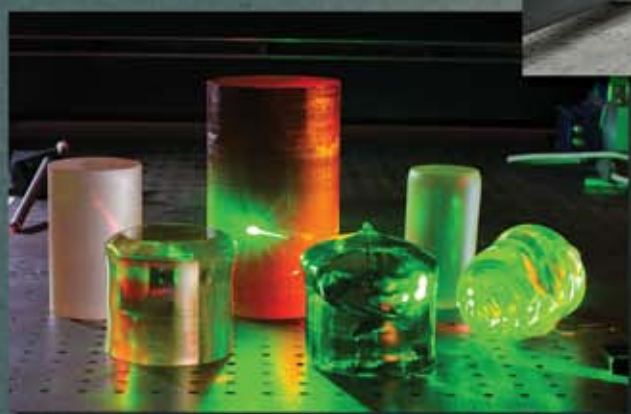


## ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



**ЭЛЕКТРОН**  
КАРАТ

К статье  
«НВП "Электрон-Карат" — 45 років»



# 4—5 2017

ИЮЛЬ — ОКТЯБРЬ

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

ISSN 2225-5818

Регистрационный номер КВ 21788-11688ПР

Выходит один раз в 2 месяца

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

Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев)

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

---

*Номер выпущен при поддержке*

*НПП «Сатурн», (г. Киев),*

*ЧАО «Украналит» (г. Киев),*

*НПП «Карат» (г. Львов),*

*ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)*

## 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.

---

**Адрес редакции:** Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17.

E-mail: [tkea@optima.com.ua](mailto:tkea@optima.com.ua), web-сайт: [www.tkea.com.ua](http://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. Корецкая.

**ТЕХНОЛОГИЯ  
И  
КОНСТРУИРОВАНИЕ  
В  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2017 № 4–5**

Год издания 41-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

*К.т.н. В. М. Чмиль*

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)*

*Д.т.н. Г. А. Оборский (г. Одесса)*

*Е. А. Тихонова (г. Одесса)*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Д.т.н. С. Г. Антошук (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)*

*Д.т.н. А. А. Дружинин (г. Львов),*

*К.т.н. И. Н. Еримичой (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. Днепр)*

*К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)*

*К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)*

*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. З. 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 «Политехперіодика»

Одобрено к печати

Ученым советом ОНПУ

(Протокол № 2 от 24.10 2017 г.)

Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

## СОДЕРЖАНИЕ

### Электронные средства: исследования, разработки

Модели печатных плат для непаяного монтажа электронных компонентов методом прокола фольги. *А. А. Ефименко, Б. П. Палюх*

3

Моделирование структуры чувствительного элемента магниторезистивного преобразователя. *Ю. Ф. Зиньковский, А. И. Вытяганец* (на украинском)

10

### Энергетическая электроника

Балансировка напряжения модульного накопителя энергии источника питания для контактной микросварки. *Ю. В. Кожушко, А. Ф. Бондаренко* (на украинском)

15

### Обеспечение тепловых режимов

Термическое сопротивление алюминиевой гравитационной тепловой трубы с резьбовой капиллярной структурой. *Ю. Е. Николаенко, Д. В. Козак*

24

Сравнительный анализ основных параметров и показателей надежности двухкаскадных ТЭУ с различной геометрией ветвей термоэлементов в различных режимах работы. *В. П. Зайков, В. И. Мещеряков, Ю. И. Журавлёв*

32

### Материалы электроники

Исследование влияния кислорода на скорость и анизотропию глубинного травления кремния в плазмохимическом реакторе с управляемым магнитным полем. *В. В. Гладковский, О. А. Федорович*

40

Пассивация поверхности высокочистых гранулированных металлов: цинка, кадмия, свинца. *Л. А. Пироженов, С. С. Пояркова, А. П. Щербань, Ю. В. Горбенко, А. В. Рыбка*

45

### Метрология. Стандартизация

Способ экспресс-оценки октанового числа бензина с использованием портативного спектроимпедансного измерителя и методов статистического анализа. *А. В. Мамыкин, А. Л. Кукла, А. С. Майстренко, Е. П. Мацас, Л. М. Матвиенко*

52

### К истории науки и техники

НПП «Электрон-Карат» — 45 лет успеха. *Н. М. Вакив, И. М. Сыворотка, А. М. Булат* (на украинском)

61

### Список рецензентов номера

64

### Новые книги

14

## ЗМІСТ

**Електронні засоби: дослідження, розробки**

Моделі друкованих плат для непаяного монтажу електронних компонентів методом проколювання фольги. *А. А. Єфіменко, Б. П. Палиух* (3)

Моделювання структури чутливого елементу магніто-резистивного перетворювача. *Ю. Ф. Зінковський, А. І. Витяганець* (10)

**Енергетична електроніка**

Балансування напруги модульного накопичувача енергії джерела живлення для контактного мікрозварювання. *Ю. В. Кожушко, О. Ф. Бондаренко* (15)

**Забезпечення теплових режимів**

Термічний опір алюмінієвої гравітаційної теплової труби з різьбовою капілярною структурою. *Ю. Є. Ніколаєнко, Д. В. Козак* (24)

Порівняльний аналіз основних параметрів і показників надійності двокаскадних ТЕУ з різною геометрією гілок термоелементів в різних режимах роботи. *В. П. Зайков, В. І. Мещеряков, Ю. І. Журавльов* (32)

**Матеріали електроніки**

Дослідження впливу кисню на швидкість і анізотропію глибинного травлення кремнію в плазмо-хімічному реакторі з керованим магнітним полем. *В. В. Гладковський, О. А. Федорович* (40)

Пасивація поверхні високочистих гранульованих металів: кадмію, цинку, свинцю. *Л. О. Пироженко, С. С. Пояркова, О. П. Щербань, Ю. В. Горбенко, О. В. Рибка* (45)

**Метрологія. Стандартизація**

Спосіб експрес-оцінки октанового числа бензину з використанням портативного спектроімпедансного вимірювача і методів статистичного аналізу. *А. В. Мамикін, О. Л. Кукла, А. С. Майстренко, Є. П. Мацас, Л. М. Матвієнко* (52)

**До історії науки і техніки**

НВП «Електрон-Карат» — 45 років успіху. *М. М. Ваків, І. М. Сиворотка, А. М. Булат* (61)

## CONTENTS

**Electronic devices: research, development**

Models of printed boards for solderless mounting of electronic components by foil perforation method. *A. A. Yefimenko, B. P. Paliukh* (3)

Modeling the structure of the sensitive element of the magnetoresistive converter. *Yu. F. Zinkovsky, A. I. Vityaganets* (10)

**Power electronics**

Voltage balancing in modular energy storage of power supply for micro resistance welding. *Yu. V. Kozhushko, O. F. Bondarenko* (15)

**Thermal management**

Thermal resistance of aluminum gravity heat pipe with threaded capillary structure. *Yu. E. Nikolaenko, D. V. Kozak* (24)

Comparative analysis of the main reliability indices and parameters of two-stage thermoelectric devices with different geometry of the branches of thermoelements in various operating modes. *V. P. Zaikov, V. I. Meshcheryakov, Yu. I. Zhuravlyov* (32)

**Materials of electronics**

Investigation of the influence of oxygen on the rate and anisotropy of deep etching of silicon in the plasma-chemical reactor with the controlled magnetic field. *V. V. Hladkovskiy, O. A. Fedorovich* (40)

Surface passivation of high purity granular metals: zinc, cadmium, lead. *L. A. Pirozhenko, S. S. Poyarkova, A. P. Shcherban, Yu. V. Gorbenko, A. V. Rybka* (45)

**Metrology. Standardization**

A method for express estimation of the octane number of gasoline using a portable spectroimpedance meter and statistical analysis methods. *A. V. Mamykin, A. L. Kukla, A. S. Maistrenko, E. P. Matzas, L. M. Matvienko* (52)

**On the history of science and engineering**

SRC «Electron-Karat» — 45 years of success. *M. M. Vakiv, I. M. Syvorotka, A. M. Bulat* (61)



Д. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО, Б. П. ПАЛЮХ

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

## МОДЕЛИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ДЛЯ НЕПАЯНОГО МОНТАЖА ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ МЕТОДОМ ПРОКОЛА ФОЛЬГИ

*Представлены модели печатных плат (ПП) для усовершенствованного метода прокола фольги. Проведена оценка плотности электрических соединений таких ПП в сравнении с ПП для монтажа в отверстия и поверхностного монтажа. Рассмотрены технологические отличия изготовления печатных плат для метода прокола фольги от традиционного метода.*

**Ключевые слова:** печатная плата, метод прокола фольги, метод монтажа в отверстия, поверхностный монтаж.

На сегодняшний день для электрического соединения выводов электронных компонентов на печатных платах наряду с паяными соединениями достаточно широко применяют соединения, выполняемые запрессовкой, обладающие высокой технологичностью, надежностью, стойкостью к вибрациям, коррозионной стойкостью. Поскольку такие соединения являются экологически чистыми, они составляют серьезную конкуренцию паяным, а технологию запрессовки можно рассматривать как более эффективную и перспективную альтернативу технологиям пайки.

Из непаяных контактных соединений часто используются контактные соединения «press-fit» [1], у которых среди недостатков можно выделить сложность технологии изготовления контактных выводов-штырей, их значительные размеры в поперечном сечении и, как следствие, серьезные ограничения для уменьшения шага расположения выводов, что особенно важно для многовыводных электронных компонентов. Более технологичными являются контактные соединения на печатной плате, выполненные методом прокола фольги (МПФ) [2]. В этом случае используется простая конструкция выводов, размеры которых при необходимости можно уменьшать до долей миллиметра, что способствует миниатюризации соединений. Здесь, однако, можно выделить недостаток, связанный с изготовлением печатных плат, которые используются для реализации этого метода, — наличие глухих отверстий, что снижает технологичность изготовления печатных плат (ПП). Кроме этого, следует также отметить возможность проявления негативного действия релаксации диэлектрической основы печатной платы.

В настоящей работе разработаны модели печатных плат, предназначенных для непаяного монтажа методом прокола фольги с гибким пленочным диэлектриком, которые обеспечивают надежность электрического контакта.

### Конструкция ПП для монтажа усовершенствованным МПФ

Для улучшения технологичности и надежности контактного соединения предлагается выполнять его усовершенствованным методом прокола фольги — в отличие от описанной в [2] конструкции, ПП содержит гибкую печатную плату, которая приклеивается к жесткой.

На **рис. 1** представлено контактное соединение, состоящее из электронного компонента, гибкой печатной платы (ГПП) с контактной площадкой без отверстия и жесткой печатной платы (ЖПП) со сквозным отверстием. Соединение выполняется следующим образом.

Вывод 1 с заостренным концом 2 электронного компонента 3 под механическим воздействием прокалывает фольгу контактной площадки 6 вместе с пленочной основой 5 ГПП, разрывая

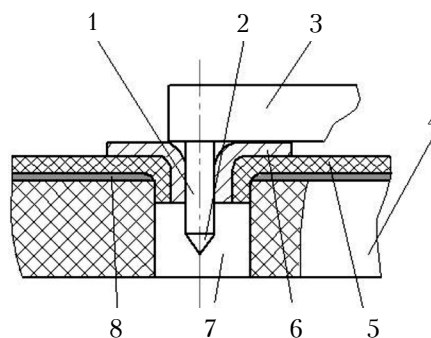
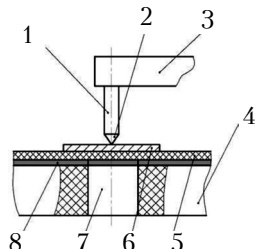
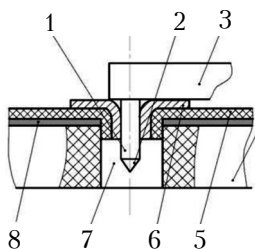
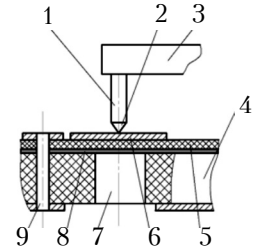
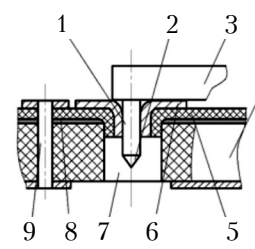
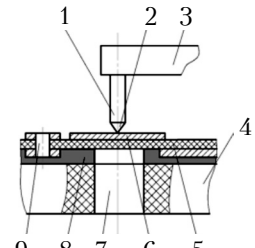
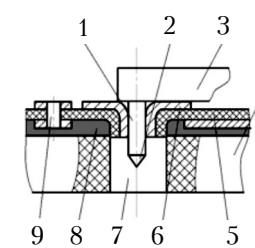
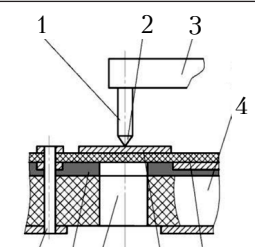
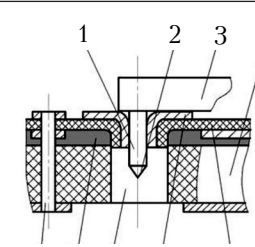
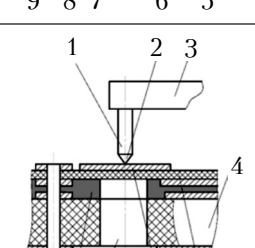
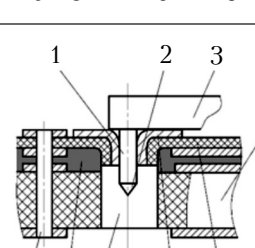
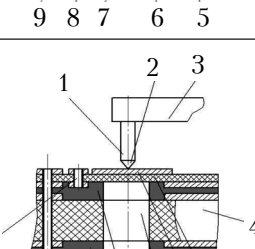
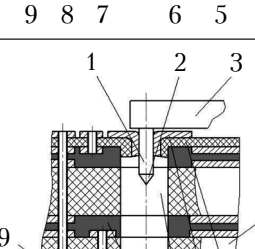


Рис. 1. Контактное соединение

Таблица 1

Реализация монтажа ЭК на ПП, выполненных на базе ГПП с пленочной основой, различных конструкций

Конструкция ПП	ПП до монтажа	ПП с установленными ЭК	Обозначения
Односторонняя ПП, состоящая из односторонней ГПП, приклеенной на основу ЖПП			<p>1 — вывод; 2 — заостренный конец вывода; 3 — ЭК; 4 — ЖПП; 5 — ГПП; 6 — контактная площадка ГПП; 7 — сквозное отверстие в ЖПП; 8 — слой клея; 9 — переходное отверстие между проводящими слоями</p>
Двусторонняя ПП, состоящая из односторонней ГПП, приклеенной на одностороннюю ЖПП			
Двусторонняя ПП, состоящая из двусторонней ГПП, приклеенной на одностороннюю ЖПП			
Трехслойная ПП, состоящая из двусторонней ГПП, приклеенной на одностороннюю ЖПП			
Четырехслойная ПП, состоящая из двусторонней ГПП, приклеенной на двустороннюю ЖПП			
Шестислойная ПП, состоящая из двусторонней ГПП, приклеенной на четырехслойную ЖПП, состоящую из двух двусторонних ЖПП			

их на полоски, которые при дальнейшем введении вывода в отверстие 7 в основе ЖПП 4 вдоль его оси с силой прижимаются к стенкам этого отверстия выводом электронного компонента. Надежность контактного соединения достигается за счет того, что диаметр вывода или описанной вокруг его поперечного сечения окружности (если форма сечения отлична от круга) больше диаметра отверстия.

Этот метод позволяет за счет применения сквозного отверстия в ЖПП повысить уровень технологичности печатной платы по сравнению с методом, когда используется печатная плата с глухим отверстием [2]. Кроме того, благодаря тому, что ГПП обладает свойствами пленочного диэлектрика, обеспечивается более плотный прижим фольги контактной площадки к поверхности вывода и, соответственно, более качественное контактное соединение в условиях временной релаксации слоистого диэлектрика ЖПП.

Структура печатных плат зависит от того, какое необходимо количество проводящих слоев. Некоторые предлагаемые конструктивные модели печатных плат с пленочным фольгированным диэлектриком в их составе для контактного соединения методом прокола фольги представлены в **табл. 1**. Модели ПП с большим количеством слоев могут быть представлены аналогично.

Конструкция печатной платы наряду с формой сечения и размерами выводов ЭК является определяющей в процессе создания надежного непаяного контактного соединения. При этом, однако, немаловажными являются и такие показатели ПП, как плотность электрических соединений, которая зависит от количества контактных площадок на всех слоях, в том числе относящихся к переходным отверстиям, и технологичность изготовления.

#### Анализ плотности электрических соединений ПП для монтажа методом прокола фольги

Проведем сравнение показателей плотности электрических соединений на ПП для монтажа МПФ и на ПП других актуальных типов — для монтажа на поверхность (МП) и монтажа в отверстие (МО).

В силу того, что реальные конструкции ПП для МПФ отсутствуют, и с учетом необходимости обеспечения идентичности топологий печатных плат за основу взяты ПП для МП, и на основе данных о переходных отверстиях и контактных площадках (КП) смоделированы аналогичные модели ПП для МПФ и МО. Для упрощения моделей и проведения последующего сравнения предполагаем, что межконтактные соеди-

нения (печатные проводники) идентичны для всех трех типов ПП, а различия касаются только контактных соединений, т. е. количества, размеров и формы контактных площадок.

С учетом особенностей перехода от одного способа монтажа к другому, для перехода от монтажа на поверхность к монтажу в отверстия и методом прокола фольги были выделены следующие три группы контактных площадок:

I — КП электронных компонентов без переходных отверстий;

II — КП электронных компонентов с КП переходных отверстий между слоями;

III — КП переходных отверстий, не связанных с КП электронных компонентов, которые используются для обхода печатных проводников.

Переход от КП для монтажа на поверхность к КП для монтажа МПФ и МО продемонстрирован в **табл. 2**. Контактная площадка I группы переходит в КП с отверстием для МО и для МПФ. Контактная площадка II группы переходит в КП с переходным отверстием для МО, которое в этом случае используется как монтажное и переходное одновременно, а для МПФ — в КП с отверстием под вывод с дополнительным переходным отверстием, аналогично монтажу на поверхность. Что касается КП переходных отверстий III группы, то они остаются неизменными для всех способов монтажа, а значит, не изменяется количество переходных отверстий и занимаемая контактными площадками площадь.

На основании предложенных моделей контактных площадок и имеющихся моделей ПП для монтажа на поверхность получены соответствующие модели ПП для монтажа в отверстия и методом прокола фольги.

Подсчет количества КП и переходных отверстий, а также расчет других величин осуществлялся на моделях ПП в среде САПР Altium Designer, в которой есть все необходимые для этого инструменты, позволяющие автоматизировать сбор статистических данных [3].

Сравнение рассматриваемых типов ПП проведем с использованием следующих показателей.

1. Плотность контактных и межслойных соединений в каждом слое, конструктивно определяемая множеством контактных площадок:

$$P_{\text{КП}} = N_{\text{КП}} / S_{\text{ПП}}, \quad (1)$$

где  $S_{\text{ПП}}$  — площадь печатной платы;  
 $N_{\text{КП}}$  — количество КП в слое,  $N_{\text{КП}} = N_{\text{ЭК}} + N_{\text{ПО}}$ ;  
 $N_{\text{ЭК}}$ ,  $N_{\text{ПО}}$  — количество КП для монтажа выводов ЭК и переходных отверстий в слое соответственно.

Таблица 2

Переход от контактных площадок ПП для монтажа на поверхность к КП для монтажа в отверстия и монтажа методом прокола фольги

Группа КП	КП на ПП для монтажа на поверхность	КП на ПП для монтажа в отверстия	КП на ПП для монтажа методом прокола фольги	Обозначения
I				<p>1 — КП электронного компонента; 2 — печатный проводник; 3 — диэлектрическое основание ПП; 4 — переходное отверстие; 5 — КП переходного отверстия; — отверстие под вывод</p>
II				
III				

2. Коэффициент использования площади печатной платы контактными площадками ЭК и переходных отверстий в каждом слое:

$$K_{S \text{ КП}} = (\sum S_{\text{КП ЭК}} + \sum S_{\text{КП ПО}}) / S_{\text{ПП}}, \quad (2)$$

где  $\sum S_{\text{КП ЭК}}$ ,  $\sum S_{\text{КП ПО}}$  — суммарная площадь, занимаемая контактными площадками ЭК и переходными отверстиями, соответственно.

Принимая во внимание, что контактные площадки ЭК имеют различные размеры, для удобства подсчета занимаемой ими площади сделаем допущение, которое существенно не повлияет на результаты анализа — будем использовать средние значения площади КП для электронных компонентов  $S_{\text{КП ЭК}}^{\text{ср}}$  и для переходных



отверстий  $S_{\text{КП ПО}}^{\text{ср}}$ . Соответственно, формула (3) примет следующий вид:

$$K_{S \text{ КП}} = (S_{\text{КП ЭК}}^{\text{ср}} n_{\text{ЭК}} + S_{\text{КП ПО}}^{\text{ср}} n_{\text{ПО}}) / S_{\text{ПП}}, \quad (3)$$

где  $n_{\text{ЭК}}$ ,  $n_{\text{ПО}}$  — количество КП, соответственно, электронных компонентов и переходных отверстий на печатной плате.

Произведем расчет плотности электрических соединений по приведенным показателям.

На основании моделей трех групп КП, представленных в табл. 2, в табл. 3 указана площадь КП в каждом слое для сравниваемых способов монтажа. При этом следует иметь в виду, что площадь, занимаемая контактными площадками для монтажа МПФ на внутренних слоях и на внешнем слое со стороны, где отсутствуют электронные компоненты, приведена несколько упрощенно, поскольку для этих слоев не характерно наличие КП на монтажных отверстиях, и во внутренних слоях эта площадь не используется для проводникового рисунка. Это, однако, не снижает существенно точность расчетов и, к тому же, не улучшает показатель плотности электрических соединений для МПФ.

При использовании формул (1) и (3) и результатов подсчета количества контактных площадок на ПП для рассматриваемых способов монтажа были определены показатель плотности контактных и межслойных соединений  $P_{\text{КП}}$  и коэффициент использования площади печатной платы контактными площадками ЭК и переходных отверстий  $K_{S \text{ КП}}$  для каждого слоя. Их усредненные по всем ПП значения сведены в табл. 4.

Таблица 3

Площадь, занимаемая контактными площадками в каждом слое ПП для различных типов монтажа

Группа	Тип монтажа	Обозначение для проводникового слоя:		
		внешнего со стороны		внутреннего
		монтажа ЭК	без ЭК	
I	МП	$S_{\text{КП ЭК}}$	—	—
	МО	$S_{\text{КП ЭК}}$		
	МПФ	$S_{\text{КП ЭК}}$		
II	МП	$S_{\text{КП ЭК}} + S_{\text{КП ПО}}$	$S_{\text{КП ПО}}$	$S_{\text{КП ПО}}$
	МО	$S_{\text{КП ЭК}} (*)$		
	МПФ	$S_{\text{КП ЭК}} + S_{\text{КП ПО}}$		
III	МП	$S_{\text{КП ПО}}$		
	МО			
	МПФ			

\*Отверстие используется одновременно как монтажное и переходное

Таблица 4

Средние значения показателя плотности электрических соединений и коэффициента использования площади ПП для различных типов монтажа

Способ монтажа	Слой ПП	$\bar{P}_{\text{КП}}, \text{см}^{-2}$	$\bar{K}_{S \text{ КП}} \cdot 100\%$
МП	Внешний с ЭК	3,283	4,694
	Внешний без ЭК	1,686	2,410
	Внутренний	1,686	2,410
МО	Внешний с ЭК	2,308	3,300
	Внешний без ЭК	2,308	3,300
	Внутренний	2,308	3,300
МПФ	Внешний с ЭК	3,283	4,694
	Внешний без ЭК	3,283	4,694
	Внутренний	3,283	4,694

По результатам анализа приведенных в табл. 4 данных можно заключить, что плотность размещения КП на ПП для монтажа МПФ выше, чем для двух других типов ПП, особенно по сравнению с ПП для монтажа на поверхность. Так, для внешнего слоя без ЭК и внутреннего слоя плотность размещения КП почти в два раза выше и составляет 3,283 КП на квадратный сантиметр. При этом может показаться, что ощутимо ухудшаются условия для трассировки проводников. Однако более объективная оценка с помощью коэффициента использования площади ПП контактными площадками показывает, что площадь, занимаемая КП, составляет не более чем 4,7% площади ПП для монтажа МПФ и не менее чем 2,4% площади ПП для монтажа на поверхность. То есть, заполнение площади ПП контактными площадками очень мало, и даже двукратное увеличение  $K_{S \text{ КП}}$  не создаст трудностей, связанных с нехваткой пространства для размещения КП и трасс проводников.

Таким образом, незначительное снижение коммутационных возможностей ПП для монтажа МПФ не может служить препятствием для его внедрения.

#### Анализ технологичности ПП для монтажа методом прокола фольги

Для проведения анализа сравним этапы изготовления печатных плат для монтажа МПФ с традиционными методами, которые используются для изготовления ПП под монтаж на поверхность и в отверстия [4].

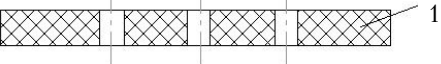
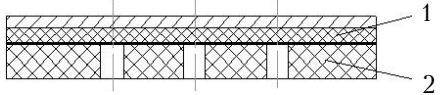
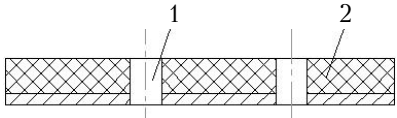
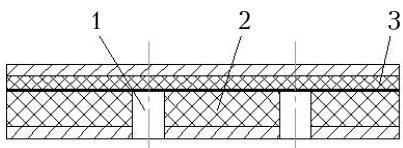
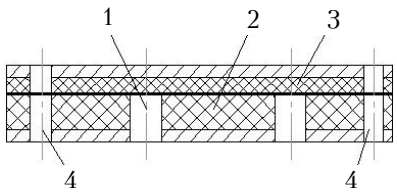
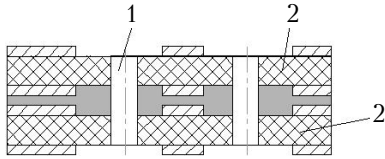
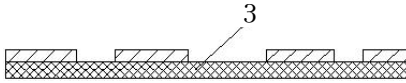
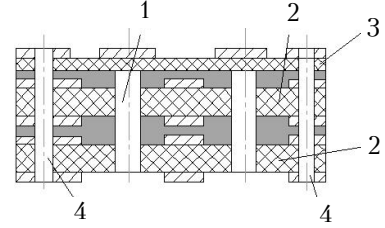
Технология изготовления односторонних ПП для монтажа МПФ отличается от других тем, что в этом случае перед нанесением слоя фоторезиста необходимо просверлить сквозные отверстия в жестком диэлектрическом основании, а затем на его поверхность приклеить односто-

ронный гибкий фольгированный диэлектрик. Остальные операции такие же.

Этапы технологии изготовления односторонних, двусторонних и многослойных печатных плат для различных типов монтажа представлены в табл. 5. Здесь видно, что изготовление

Таблица 5

Этапы изготовления печатных плат для различных типов монтажа

Операции для ПП для монтажа в отверстия и на поверхность		Операции для ПП для монтажа МПФ
<b>Односторонняя ПП</b>		
Сверловка отверстий	Сверловка отверстий в основании жесткого диэлектрика 1	
	Приклеивание гибкого фольгированного диэлектрика 2 к поверхности жесткого 1	
<b>Двусторонняя ПП</b>		
Сверловка монтажных и переходных отверстий	Сверловка отверстий 1 под выводы ЭК в основании 2 жесткого одностороннего фольгированного диэлектрика	
	Приклеивание гибкого фольгированного диэлектрика 3 к поверхности жесткого 2	
	Сверловка переходных отверстий 4	
<b>Многослойная ПП</b>		
Склеивание пакета из отдельных ПП, сверловка и металлизация монтажных и переходных отверстий	Склеивание пакета из отдельных ПП 2, сверловка монтажных отверстий 1	
	Изготовление внешнего слоя для установки ЭК в виде ГПП 3	
	Приклеивание ГПП 3 к поверхности пакета 2, сверловка и металлизация сквозных переходных отверстий 4	

печатных плат для монтажа МПФ отличается от других дополнительными операциями, связанными с приклеиванием гибкой ПП на поверхность жесткой и выполнением переходных отверстий. Это, однако, лишь незначительно удорожает ПП, поскольку такие операции являются типовыми.

### Выводы

Предложенные модели ПП для монтажа усовершенствованным контактным методом прокола фольги, который заключается в применении гибкой ПП, приклеенной на поверхность жесткой, способствуют повышению технологичности выполнения и надежности электрического контакта. Модели контактного соединения МПФ демонстрируют возможность его применения независимо от количества слоев ПП, что безусловно актуально для современной электронной аппаратуры.

Анализ разработанных моделей печатных плат подтвердил преимущества усовершенствованного метода по сравнению с его предыдущей

версией [2], заключающиеся в повышении технологичности ПП за счет исключения глухих отверстий. Незначительное снижение коммутационных возможностей ПП для монтажа методом прокола фольги не может служить препятствием для его внедрения, поскольку собственноручно монтаж имеет существенные преимущества перед монтажом на поверхность и в отверстия.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ефименко А. А., Собченко Д. Л. Непаяные контактные соединения в электронных печатных узлах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 3. — С. 3–9.
2. Ефименко А. А. Контактные соединения в электронных печатных узлах, выполненные методом прокола фольги // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2010. — № 4. — С. 15–23.
3. Сабунин А. Е. Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств — Серия «Системы проектирования». — Москва: Солон-пресс, 2009.
4. Медведев А.М. Печатные платы. Конструкции и материалы. — Москва: Техносфера, 2005.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 26.08 2017 г.

Д. т. н. А. А. ЄФІМЕНКО, Б. П. ПАЛЮХ

Україна, Одеський національний політехнічний університет  
E-mail: aiefimen@gmail.com

## МОДЕЛІ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ДЛЯ НЕПАЯНОГО МОНТАЖУ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ МЕТОДОМ ПРОКОЛЮВАННЯ ФОЛЬГИ

*Представлено моделі друкованих плат (ДП) для вдосконаленого методу проколювання фольги, проведено оцінку щільності електричних з'єднань таких ДП в порівнянні з ДП для методу монтажу в отвори і поверхневого монтажу. Розглянуто технологічні відмінності виготовлення друкованих плат для методу проколювання фольги від традиційного методу.*

**Ключові слова:** друкована плата, метод проколювання фольги, метод монтажу в отвори, поверхневий монтаж.

DOI: 10.15222/TKEA2017.4-5.03  
UDC 621.38.001.66

A. A. YEFIMENKO, B. P. PALIUKH  
Ukraine, Odessa National Polytechnic University  
E-mail: aiefimen@gmail.com

## MODELS OF PRINTED BOARDS FOR SOLDERLESS MOUNTING OF ELECTRONIC COMPONENTS BY FOIL PERFORATION METHOD

*The paper presents models of printed circuit boards for an improved foil perforation method. The density of electrical connections of such printed circuit boards is estimated in comparison with circuit boards obtained using the methods of mounting in holes and surface mounting. The technological differences in the manufacture of printed circuit boards for the foil perforation method and the traditional method are considered.*

**Key words:** printed circuit board, foil puncture method, hole mounting method, surface mounting.

### REFERENCES

1. Efimenko A. A., Sobchenko D. L. [Solderless contact connections in electronic printed units]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2009, no 3, pp. 3-9. (Rus)
2. Efimenko A. A. [Contact connections in electronic printed units, made by the method of foil perforation]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2010, no 4, pp. 15-23. (Rus)

3. Sabunin A. E. Altium Designer. [New solutions in the design of electronic devices — “Design systems” Series]. *Novye resheniya v proektirovanii elektronnykh ustroystv*. Moscow, Solon-press, 2009. (Rus)
4. Medvedev A.M. [Printed circuit boards. Constructions and materials] *Pechatnye platy. Konstruktsii i materialy*. Moscow, Tekhnosfera, 2005. (Rus)

Д. т. н. Ю. Ф. ЗІНЬКОВСЬКИЙ, А. І. ВИТЯГАНЕЦЬ

Україна, Національний технічний університет України  
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
 E-mail: kivra@kpi.ua, vytiaganets@ukr.net

## МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ МАГНІТОРЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

*Проведено тривимірне моделювання структури чутливого елемента магніторезистивного перетворювача активної потужності та показано розподіл струму і напруженості тангенціального електричного поля в ньому. Отримано вираз для розрахунку вхідного опору перетворювача, необхідного для обчислення струму в плівці.*

*Ключові слова:* вимірювальний перетворювач, моделювання, тонка плівка, чутливий елемент.

Вимірювання потужності, яка є основною енергетичною характеристикою пристроїв та систем, займає важливе місце в сучасних електронних системах. Одним з параметрів радіотехнічних та телевізійних систем, комплексів, пристроїв та вузлів є їх активна потужність, яка характеризує інтенсивність електромагнітних процесів. Для керування потужністю систем використовують різні нелінійні елементи і пристрої, які спотворюють та розширюють спектр вихідного сигналу, що погіршує показники систем, процесів та визначає необхідність контролю активної потужності в реальному часі.

Вдосконалення радіотехнічних та телевізійних систем, які використовуються як в електронному зв'язку, так і в технологічних процесах, потребує підвищення чутливості, точності та розширення частотного діапазону вимірювання активної потужності вимірювачами.

Питання вивчення активної потужності розглянуто в роботах багатьох дослідників, наприклад А. Я. Безиковича, Є. З. Шапіро, Г. І. Котенка, В. Ю. Ларіна, І. М. Вікуліна та ін. Аналіз відомих джерел інформації показав, що електродинамічні і феродинамічні вимірювачі потужності характеризуються значною похибкою через нелінійність та гістерезисом, великим власним споживанням енергії, великою чутливістю до зовнішніх магнітних полів, наявністю частотної і кутової похибок, невеликим обертовим моментом. Цифрові вимірювачі потужності мають складну схему обробки сигналу, діапазон частот аналого-цифрових перетворювачів обмежений (сотні МГц), а через відхилення форми кривих вхідних сигналів від синусоїдальних виникають додаткові похибки. До недоліків ватметрів на основі перетворювачів Холла можна віднести значну похибку, пов'язану з термоелектро-

рушійною силою, наявністю випрямляючих контактів в напівпровідниках, низьку чутливість і точність, складну технологію виготовлення, значний розкид параметрів однотипних перетворювачів, сильну залежність опору і коефіцієнта Холла від температури та магнітного поля, наявність залишкової напруги, низьку величину коефіцієнта корисної дії, малий динамічний діапазон вимірювання потужності (30 дБ для перетворювачів Холла і приблизно 40 дБ для електро- та феродинамічних перетворювачів) [1].

Найбільш перспективними вважаються магніторезистивні перетворювачі, оснований на гальваномагнітних явищах у тонких феромагнітних плівках із пермалоевих структур. В порівнянні з напівпровідниковими структурами вони мають на п'ять порядків більше співвідношення сигнал/завада, що разом з відсутністю випромінювання сигналів на контактах стало підставою для вибору саме цього перетворювача для подальшого дослідження.

Метою даної роботи є моделювання структури чутливого елемента магніторезистивного перетворювача і визначення розподілу в ньому струму та напруженості електричного поля.

Чутливий елемент вимірювального перетворювача активної потужності представляє собою намагнічену до насичення феромагнітну плівку, до контактів  $A$  і  $F$  якої прикладена напруга  $U$  (рис. 1). Вздовж розташованої в прямокутній системі координат анізотропної плівки розміщено провідник, струм  $I_{пл}$  у якому створює напруженість зовнішнього змінного магнітного поля, компоненти якого дорівнюють

$$h_k = h(I) \cdot \sin(\omega t + \varphi_{h(I)}), \quad (1)$$

де  $h(I)$ ,  $\varphi_{h(I)}$  — відповідно, амплітуда і фаза напруженості змінного магнітного поля.



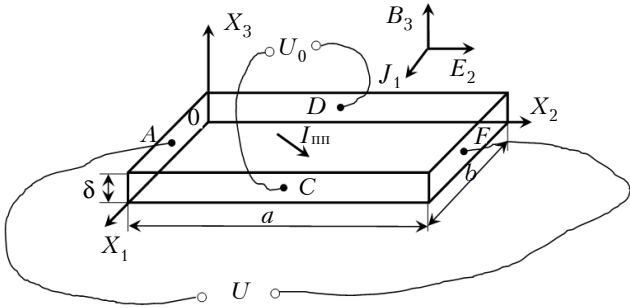


Рис. 1. Магнітна плівка в прямокутній системі координат

Напруженість перетвореного феромагнітною плівкою електричного поля дорівнює

$$E_{0i} = 0,5\text{Re}(\rho_{ip}J_p^*), \quad (2)$$

де  $\rho_{ip}$ ,  $J_p^*$  — змінні частини, відповідно, питомого магнітоопору (враховує гальваномангнітні явища в плівці) і щільності струму, які змінюються з однаковою частотою, але з різними фазами;

$i, p$  — індекси, які відповідають координатам  $X_1$  або  $X_2$ , і позначаються, відповідно, 1 або 2.

Анізотропна тонка магнітна плівка з питомим об'ємним опором  $\rho$  та товщиною  $\delta$  (складає кілька десятків нм) розташована в прямокутній лівій системі координат (рис. 1). Якщо до плівки прикладене магнітне поле з індукцією  $B$ , а однорідний струм щільністю  $J$  тече в напрямку  $0X_1$ , тобто  $J_1 \neq 0$ ,  $J_2 = J_3 = 0$ , то напруженість результуючого електричного поля, створеного в об'ємі плівки, з врахуванням рівняння (2), має вигляд [2, 3]

$$E_i = \rho_{i1}J_1 + \rho_{i1p}J_1B_p + \rho_{i1pk}J_1B_pB_k, \quad (3)$$

де  $i, p, k$  — індекси, які відповідають координатам  $X_1$ ,  $X_2$  або  $X_3$ , і позначаються, відповідно, 1, 2 або 3.

Відмітимо, що оскільки при розгляді конфігурації у намагніченій до насичення феромагнітній плівці перемагнічування відбувається тільки в її площині, ми не розглядатимемо вплив аномального ефекту Холла на плівку.

Опис компонентів електричного поля вздовж координатних осей має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} E_1 &= \rho_{11}J_1 + \rho_{1111}J_1B_1^2 + \rho_{1122}J_1B_2^2 + \rho_{1133}J_1B_3^2, \\ E_2 &= \rho_{213}J_1B_3 + (\rho_{2112} + \rho_{2121})J_1B_1B_2; \\ E_3 &= \rho_{312}J_1B_2 + (\rho_{3113} + \rho_{3131})J_1B_1B_3. \end{aligned} \quad (4)$$

За відсутності магнітного поля, тобто при  $B_1 = B_2 = B_3 = 0$ , можна записати

$$\begin{aligned} E_1 &= \rho_{11}J_1; \\ E_2 &= E_3 = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

У випадку  $B_1 = B_2 = 0$ ,  $B_3 \neq 0$

$$E_1 = \rho_{11}J_1 + \rho_{1133}J_1B_3^2;$$

$$E_2 = \rho_{213}J_1B_3;$$

$$E_3 = 0. \quad (6)$$

У випадку  $B_1 = B_2 \neq 0$ ,  $B_3 = 0$

$$E_1 = \rho_{11}J_1 + \rho_{1111}J_1B_1^2;$$

$$E_2 = (\rho_{2112} + \rho_{2121})J_1B_1B_2 = \rho_{2112}J_1B_{110}^2;$$

$$E_3 = 0, \quad (7)$$

де  $B_{110}$  — магнітна індукція в напрямку  $[110]$ .

Анізотропію магнітоопору визначимо з рівняння (7)

$$\Delta\rho = \rho_{11} - \rho_{1111} = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}, \quad (8)$$

де  $\rho_{\parallel}$ ,  $\rho_{\perp}$  — питомий опір провідного матеріалу у випадках, коли вектор індукції направлений нормально до площини пластини і коли він направлений паралельно вектору щільності струму відповідно.

Вихідна напруга між контактами  $C$  і  $D$  плівки дорівнює

$$\bar{U}_0 = \int_C^D \bar{E} d\bar{X}_1 \cong \bar{E} \bar{x}_1 b, \quad (9)$$

де  $\bar{x}_1$  — орт у напрямку осі  $0X_1$ .

Для побудови практичної тривимірної моделі до існуючої математичної моделі магніторезистивної структури [2, 3] проведемо розрахунок розподілу струму і електромагнітного поля з використанням редактора топології EMSight пакету програм Microwave Office, оскільки ці величини пов'язані з точністю перемноження вхідних сигналів. Використовуваний при цьому електродинамічний метод моментів ґрунтується на розв'язанні в спектральній області рівнянь Максвела, сформованих для тривимірного пристрою, який знаходиться в прямокутному корпусі, заповненому планарним кусочно-ламаним шаруватим середовищем.

На рис. 2 показано шарову структуру магніторезистивного перетворювача у тривимірному зображенні, яка представляє собою двопровідну лінію передачі. Чутливий елемент магніторези-

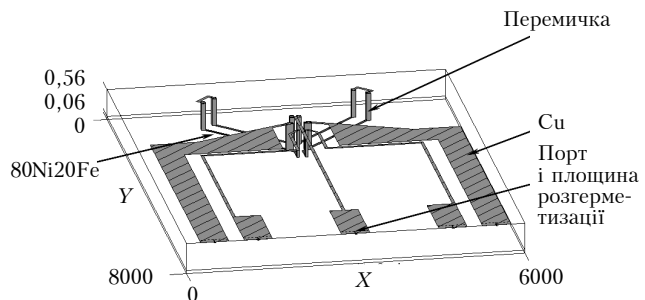


Рис. 2. Тривимірне зображення структури магніторезистивного перетворювача (шари  $\text{Cu}$  і  $80\text{Ni}20\text{Fe}$  збільшені у 1000 разів)

стивного перетворювача складається з двох симетричних петлеподібних ортогональних гілок, елементи яких з'єднані послідовно. Гілки виготовляються електронним напилюванням, відповідно, магніторезистивного (80Ni20Fe) і провідного (Cu) матеріалів на діелектричну підкладку з наступним багатошаровим процесом мікролітографії [1].

До параметрів діелектричних шарів відносяться їх товщина  $h$ , відносна діелектрична проникність  $\epsilon_r$ , тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$ . Ці параметри для шару Cu, який служить для закорочування сигналів в структурі, для немагнітострикційного шару на основі сплаву 80Ni20Fe та для шару повітря наведено у таблиці.

Параметри діелектричних шарів [4, с. 34]

Шар	Параметр шару		
	$h$ , мкм	$\epsilon_r$	$\text{tg}\delta$
Cu	0,50	3,38	0
80Ni20Fe	0,06	3,38	0
Повітряний	1,00	1,00	0

Електромагнітна (ЕМ) структура магніторезистивного перетворювача в EMSight створювалась в наступній послідовності.

1. Завдання корпусу в EMSight: задається матеріал для всіх шарів ЕМ-структури, встановлюються граничні умови, визначається загальний розмір структури і проводиться її розбиття на комірки, які будуть використовуватися для специфікації матеріалу провідників структури.

2. Завдання граничних умов: стінки корпусу та його верхня границя — ідеальні провідники, нижня — ситалова підкладка (СТ50-1).

3. Додавання провідників до топології.

4. Додавання перемичок VIA для міжшарового з'єднання підкладки. Верхня і нижня границі перемички замикають провідні форми, як звичайні пласкі провідники. Струм, який протікає через перемичку, моделюється як одноріднонапрявлений об'ємний струм. Одна з основних умов, необхідних для моделювання перемички, — вимоги до її довжини. Приймається, що вона дорівнює товщині діелектричного шару та є коротшою за довжину хвилі.

5. Додавання електричних портів на краю корпусу (крайові порти) і площин розгерметизації. Порти — це дві клеми, які використовуються для моделювання вводу потужності в структуру і виводу її із структури. Фізично порт представляє собою джерело живлення, яке збуджує струм в структурі.

6. Завдання частот моделювання (0,005 — 1,5 МГц).

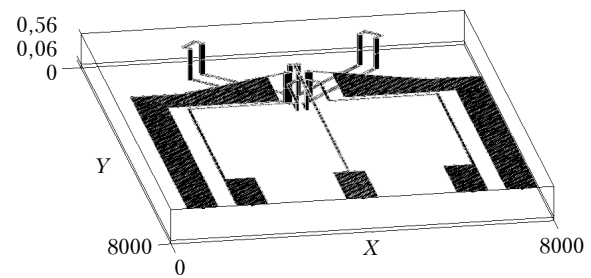


Рис. 3. Візуалізація струму на поверхні провідників

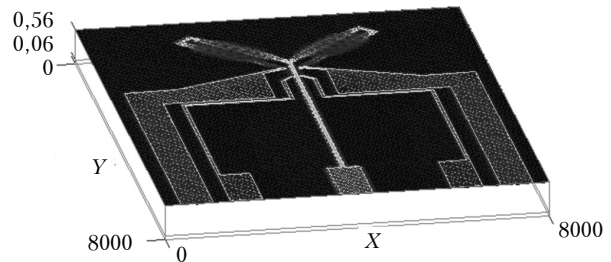


Рис. 4. Візуалізація напруженості електричного поля в площині шару Cu

Редактор топології EMSight програми Microwave Office використовує портові навантаження, щоб показати струми в структурі. На рис. 3, де показане тривимірне зображення стоячих хвиль струмів на металевих поверхнях, візуалізовано векторний розподіл струму.

На рис. 4 представлено візуалізацію тангенціального електричного поля ( $E$ -поля) в одній з площин тривимірного представлення, яка демонструє нерівномірний розподіл  $E$ -поля в феромагнітній плівці.

В пакеті Microwave Office було змодельовано залежність дійсної ( $R$ ) та уявної ( $X$ ) складових розподіленого вхідного опору магніторезистивного перетворювача від частоти  $f$  (рис. 5). Для можливості проведення оцінки отриманих результатів були проведені розрахунки цих складових:

$$R = 0,5(l \cdot R_s / h) = 288,4 \text{ Ом}; \quad (10)$$

$$X = -1 / (2\pi f C) = -1,06 \dots -3,18 \text{ Ом}, \quad (11)$$

де  $l$  — довжина петлі;

$R_s$  — поверхневий питомий опір плівки;

$h$  — ширина смужки;

$C$  — ємність.

Розходження між значеннями, які отримані за формулами (10) та (11), та тими, що були отримані в процесі моделювання, пояснюються втратами, які обумовлені домішками та шорсткістю поверхні, що не враховується при моделюванні. Одним із способів узгодження результатів моделювання і вимірювань є зменшення провідності провідників на 10–20%.

Таким чином, при відомому значенні прикладеної вхідної напруги можна розрахувати струм,

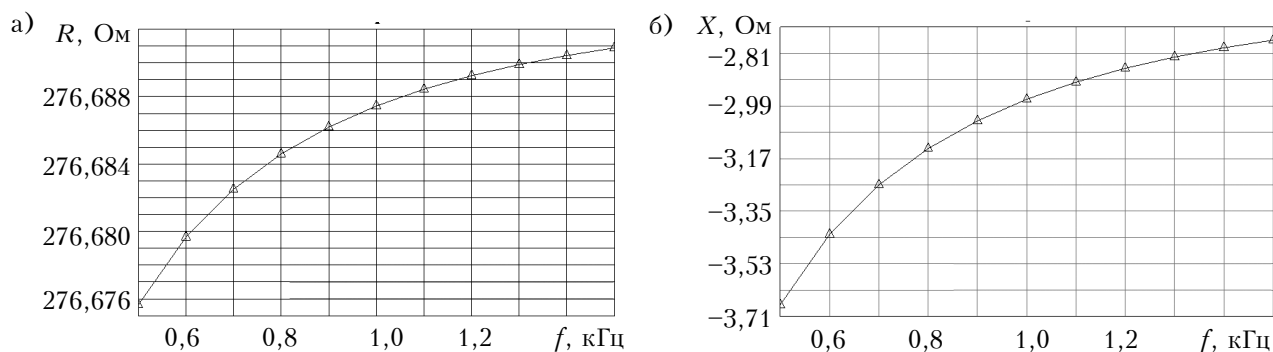


Рис. 5. Залежність дійсної (а) та уявної (б) складових вхідного опору перетворювача від частоти

який протікає у вимірювальному перетворювачі, що необхідно при розрахунку подільника вхідної напруги. Струм в магніторезистивній структурі дорівнює

$$I = U / (R_{\text{стр}} + r), \quad (12)$$

де  $U$  — вхідна напруга;

$R_{\text{стр}}$  — опір структури, де мідь «накриває» пермалой;

$r$  — опір плівки.

Оскільки струм у магніторезистивній плівці по фазі випереджує напруженість електричного поля  $E$  на  $\pi/2$  (як для ємності), а при резонансі намагніченість відстає від  $E$  на  $\pi/2$  (як для індуктивності), сумарна фаза дорівнюватиме  $\pi/2 + \pi/2 = 0$ , тому при резонансі буде максимальний вихідний сигнал.

### Заключення

Знайдено розподіл та напрямок струму і тангенціального електричного поля ( $E$ -поля) при аналізі електромагнітної структури для чутливого елементу перетворювача, який використовується в магніторезистивній системі, призначеній для вимірювання активної потужності в ді-

апазоні частот від 0 (для постійного струму) до сотень мегагерц. Завдяки цьому можна знівелювати паразитні складові струму впоперек структури і тим самим удосконалити топологію чутливого елементу перетворювача.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Витяганець А.І., Вунтесмері В.С. Засоби вимірювання активної потужності на низьких та середніх частотах «in situ» // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2007. — Вип. 34. — С. 112—118.
2. Vountesmeri V., Vytiaganets A. A mathematical model of measuring transformer of active power of middle frequencies // 10th Int. conf. «Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science» (TCSET'2010). — Lviv, 2010.
3. Витяганець А.І. Математична модель магніторезистивного вимірювального перетворювача активної потужності середніх частот // Труды III Междунар. молодеж. науч.-технич. конф. «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (РТ-2007). — Україна, Крим, Севастополь, 2007. — С. 245.
4. Зиньковский Ю.Ф., Домнич В.И. Конструирование РЭС. Оценка и обеспечение тепловых режимов. — Киев: УМК ВО, 1990.

Надійшла до редакції 11.08 2017 г.

Ю. Ф. ЗИНЬКОВСКИЙ, А. И. ВЫТЯГАНЕЦ

Украина, Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»  
E-mail: kivra@kpi.ua, vytiaganets@ukr.net

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МАГНИТОРЕЗИСТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Проведено моделювання структури чутливого елемента магніторезистивного преобразователя активной мощности, показано распределение тока и напряжения тангенциального электрического поля в нем. Получено выражение для расчета входного сопротивления преобразователя, необходимое для нахождения тока в пленке.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, моделирование, тонкая пленка, чувствительный элемент.

DOI: 10.15222/TKEA2017.4-5.10  
UDC 621.372

Yu. F. ZINKOVSKY, A. I. VITYAGANETS

Ukraine, NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»  
E-mail: kivra@kpi.ua, vytiaganets@ukr.net

## MODELING THE STRUCTURE OF THE SENSITIVE ELEMENT OF THE MAGNETORESISTIVE CONVERTER

*In the analysis of the electromagnetic structure the distribution and direction of current and the tangential electric field (E-fields) are found. The sensing element of the converter, which is used in the magnetoresistive system, is designed to measure active power in the frequency range from DC to hundreds of megahertz. An expression for the input resistance of the measuring transducer of the active power required for calculating the current in the film is obtained.*

*The simulation of the current distribution and tension of the tangential electric field in the three-dimensional structure of the sensitive element of the magnetoresistive measuring converter of active power was carried out. Knowing the direction of current along the structure it is possible to dampen the parasitic components of the current across the structure, which allows improving the topology of the sensitive element of the converter.*

**Keywords:** measuring transducer, modeling, thin film, sensitive element.

### REFERENCES

1. Vytiaganets A. I., Vountesmeri V. S. [Means of measurement of active power at low and medium frequencies «IN SITU»]. *Visnik NTUU "KPI". Ser. Radiotekhnika. Radioaparaturbuduvannya*. 2007, vol. 34, pp. 112-118. (Ukr)
2. Vountesmeri V. S., Vytiaganets A. A. [A Mathematical Model of Transformer of Active Power of Medium Frequencies]. *10<sup>th</sup> International Conf. Modern Problems*

*of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2010)*. Lviv, 2010.

3. Vytiaganets A. I. [Mathematical model of magnetoresistive measuring transducer of active power of medium frequencies] *3<sup>rd</sup> Intern. scientific and technical conf., «Sovremennye problemy radiotekhniki i telekommunikatsii» (RT-2007)*. Sevastopol, 2007, pp. 245. (Ukr)

4. Zinkovsky Yu. F., Domnich V. I. *Otsenka i obespechenie teplovykh rezhimov* [Assessment and maintenance of thermal regimes]. Kyiv: UMK VO, 1990. (Rus)

### НОВЫЕ КНИГИ

**Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлёв Ю. И. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 2. Каскадные устройства: монография.— Одесса: Политехпериодика, 2016.**

Книга посвящена прогнозированию показателей надежности каскадных термоэлектрических устройств (КТЭУ) при их проектировании и оценке показателей надежности КТЭУ выбранной конструкции.

Рассмотрены функциональные зависимости, позволяющие оценить как охлаждающие возможности, так и энергетическую эффективность и показатели надежности проектируемого устройства в различных токовых режимах работы. Продемонстрирован подход, позволяющий перейти от расчетов к построению каскадных ТЭУ на основе унифицированных модулей, и подход, который позволяет оценить показатели надежности КТЭУ заданной конструкции. Проанализировано влияние тепловой нагрузки на параметры надежности КТЭУ. Приведены алгоритмы, которые помогут разработчику вести оптимизированное проектирование РЭА с использованием КТЭУ или выбрать оптимальную для поставленной задачи конструкцию КТЭУ.

Предназначена для инженеров, научных работников, а также студентов соответствующих специальностей, занимающихся вопросами надежности элементов электроники и в целом РЭА, а также разработкой и проектированием термоэлектрических устройств.





Ю. В. КОЖУШКО, к. т. н. О. Ф. БОНДАРЕНКО

Україна, Національний технічний університет України  
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
 E-mail: kozhushko\_yullia@ukr.net, bondarenkoaf@gmail.com

## БАЛАНСУВАННЯ НАПРУГИ МОДУЛЬНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ КОНТАКТНОГО МІКРОЗВАРЮВАННЯ

*Запропоновано схемне рішення для балансування напруги модульного накопичувача енергії на основі суперконденсаторів джерела живлення для контактного мікрозварювання. Наведено формули для розрахунку вузлів керування окремої комірки суперконденсаторного модуля. Проведено моделювання роботи схеми балансування напруги модуля та отримано часові діаграми процесу заряду суперконденсатора. Підтверджено працездатність та ефективність запропонованого рішення.*

**Ключові слова:** контактне мікрозварювання, накопичувач енергії, суперконденсатор, балансування напруги, імпульсний перетворювач.

Контактне зварювання на сьогодні є ефективною технологією отримання нероз'ємних з'єднань металевих виробів та конструкцій, яке не потребує допоміжних матеріалів та речовин і характеризується високою продуктивністю, малими зварювальними деформаціями конструкцій, відсутністю шкідливих викидів [1]. Характерні для контактного зварювання амплітуди струму знаходяться в діапазоні від сотень ампер до одиниць кілоампер і залежать від матеріалу та конфігурації зварюваних деталей. Зварювання може здійснюватись як змінним, так і постійним струмом, при цьому зварюванню постійним струмом надається перевага при з'єднанні деталей відповідального призначення. Це пов'язане з тим, що джерела живлення постійного струму здатні здійснювати більш точне формування зварювального струму і, відповідно, забезпечувати вищу якість з'єднань [2].

З точки зору енергоспоживання, контактне зварювання має певні особливості. Енергія для зварювання споживається імпульсами, тривалість яких є дуже малою на фоні пауз між ними і може складати від одиниць до десятків мілісекунд [3].

Побудова джерел постійного струму для зварювальних установок традиційно виконується із застосуванням топології з прямим споживанням енергії з мережі (Direct Energy). Приклад такої топології наведений на **рис. 1**. Принцип її роботи полягає в наступному. Вхідний випрям-

ляч із фільтром випрямляє та згладжує мережеву напругу. Інвертор перетворює постійний струм, що подається на його вхід, на змінний з частотою 50–100 кГц. Високочастотний знижувальний трансформатор забезпечує формування струму в кілька сотень ампер. Вихідний випрямляч із фільтром випрямляє та згладжує високочастотний змінний струм. Система керування забезпечує функцію регулювання зварювального струму.

Джерела живлення зварювальної установки, побудовані за топологією Direct Energy, зазвичай характеризуються низькою електромагнітною сумісністю з мережею, оскільки кола корекції та фільтрації не можуть повністю знівелювати вплив установки на мережу.

Для зменшення впливу на мережу бажаним є використання для живлення зварювальних установок джерел, виконаних за топологією з проміжним накопиченням енергії (Energy Storage). Така топологія сама по собі забезпечує кращу електромагнітну сумісність з мережею, а також надає більше можливостей для її поліпшення

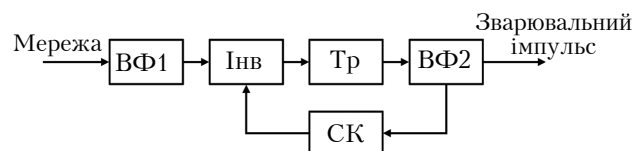


Рис. 1. Структурна схема джерела живлення постійного струму з прямим споживанням енергії з мережі (Direct Energy):

ВФ1 — вхідний випрямляч із фільтром; Инв — інвертор; Тр — трансформатор; ВФ2 — вихідний випрямляч із фільтром; СК — система керування

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (ДБ №0116U006924).

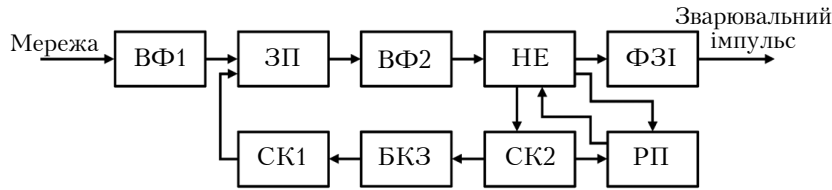


Рис. 2. Структурна схема джерела живлення постійного струму з проміжним накопиченням енергії (Energy Storage):

ВФ1 — вхідний випрямляч із фільтром; ЗП — зворотногоходовий перетворювач; НЕ — накопичувач енергії; РП — розрядний перетворювач; ВФ2 — вихідний випрямляч із фільтром; СК1 — система керування зарядного пристрою; СК2 — система керування розрядного перетворювача; БКЗ — блок керування зарядом накопичувача енергії; ФЗІ — формувач зварювального імпульсу

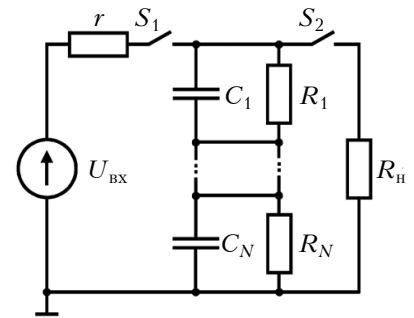


Рис. 3. Еквівалентна схема модуля з суперконденсаторами [5]

шляхом застосування кіл корекції та фільтрації. Варіант структури джерела живлення, побудованого за топологією Energy Storage, наведено на **рис. 2**. Принцип роботи цієї схеми полягає в наступному. Змінна напруга мережі живлення випрямляється вхідним випрямлячем і згладжується фільтром. Зворотногоходовий перетворювач нормалізує напругу до рівня, необхідного для зарядження суперконденсаторного модуля. Система керування зарядного пристрою здійснює керування напругою заряду, змінюючи ширину високочастотних імпульсів.

Система керування розрядного перетворювача відслідковує рівень напруги на елементах накопичувача енергії і в момент досягнення певного значення напруги дозволяє роботу розрядного перетворювача. При досягненні напругою на кожному елементі накопичувача номінального значення блок керування зарядом дозволяє роботу зворотногоходового перетворювача і накопичувач відключається від мережі живлення. Блок формування зварювального імпульсу здійснює розряд модуля за певним законом, формуючи таким чином зварювальний імпульс.

Отже, використання топології з проміжним накопиченням енергії дозволяє зменшити негативний вплив зварювальних установок на промислову мережу живлення. Проте побудова джерел живлення для установок контактного зварювання за топологією Energy Storage ще донедавна мала невисоку розповсюдженість, оскільки передбачала застосування громіздких акумуляторних батарей та електролітичних конденсаторів для накопичення енергії, що позначалося на масогабаритних показниках. Поява і розвиток нового типу накопичувачів — суперконденсаторів — здатні суттєво покращити масогабаритні показники зварювальних установок і посприяти розширенню застосування топології з проміжним накопиченням енергії для побудови

джерел живлення установок контактного зварювання [3].

Завдяки великій ємності, низькому струму саморозрядження, широкому діапазону робочих температур і тривалому терміну експлуатації суперконденсатори широко застосовуються в сучасних електронних пристроях [4]. Основним недоліком суперконденсаторів є низьке значення номінальної напруги, яке зазвичай не перевищує 3 В. Для отримання більш значної напруги створюють модулі з послідовно з'єднаних накопичувачів. При цьому, в процесі зарядження за рахунок струму саморозрядження та відхилень від номінальної величини ємності напруга на окремих суперконденсаторах модуля не є однаковою, що може спровокувати вихід з ладу одного або кількох елементів [4–7].

Метою даної роботи є створення системи балансування напруги суперконденсаторного модуля джерела постійного струму для контактного мікрозварювання.

### Балансування напруги суперконденсаторного модуля

Еквівалентна схема модуля, до складу якого входять  $N$  суперконденсаторів, з колами заряду та розряду зображена на **рис. 3**. Загальна ємність такого модуля визначається як

$$C = \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N} \right)^{-1}, \quad (1)$$

де  $C_1, C_2, \dots, C_N$  — ємність суперконденсаторів.

Кожний суперконденсатор з номінальною напругою  $U_{ном}$  має еквівалентний опір втрат. В перший момент часу всі суперконденсатори розряджені, ключі  $S_1$  та  $S_2$  розімкнені. При замиканні ключа  $S_1$  починається процес зарядження суперконденсаторів від джерела електрорушійної сили ( $U_{BX} = U_{ном}$ ) з внутрішнім опором  $r$ . Через суперконденсатори протікає струм  $I_{max}$ , що до-

рівнює відношенню вхідної напруги до внутрішнього опору.

По мірі збільшення накопиченого заряду на суперконденсаторах струм зменшується за експоненціальним законом:

$$i(t) = I_{\max} \cdot \exp(t/\tau), \quad (2)$$

де  $\tau$  — стала часу,  $\tau = rC$ ;

$C$  — номінальна ємність модуля суперконденсаторів;  
 $I_{\max}$  — максимальний струм модуля.

За рахунок неоднакового значення ємностей суперконденсаторів величина напруги на них в загальному випадку буде неоднаковою і визначатиметься за формулою

$$U_k(t) = \frac{1}{C_k} \int_0^t i(t) dt, \quad (3)$$

де  $U_k$ ,  $C_k$  — напруга та ємність  $k$ -го суперконденсатора відповідно.

Якщо ємність суперконденсатора є меншою за номінальне значення, його напруга буде перевищувати номінальне значення, а якщо більшою — суперконденсатор не встигне зарядитись до  $U_{\text{ном}}$ .

Аналогічне співвідношення діє для процесу розряду модуля через замкнений ключ  $S2$  і опір навантаження  $R_n$  при розімкненому ключі  $S1$ . За умови, що всі суперконденсатори були заряджені до номінальної напруги, після повного розрядження модуля суперконденсатори з ємністю  $C > C_{\text{ном}}$  зберігають деякий позитивний заряд, а суперконденсатори з  $C < C_{\text{ном}}$  є негативно зарядженими, тобто відбувається зміна полярності, яка може призвести до деградації характеристик елементів.

Отже, неоднакові значення ємності суперконденсаторів у модулі обумовлюють дисбаланс напруги. Для усунення цього явища застосовують методи активного і пасивного балансування модуля суперконденсаторів.

Суть пасивного методу полягає в паралельному підключенні шунтуючих резисторів до кожної комірки модуля. В результаті утворюється резистивний дільник, який вирівнює потенціали між окремими комірками [4–6]. Недоліком пасивного методу є те, що шунтуючі резистори споживають енергію весь час, доки на суперконденсаторах є заряд, хоча необхідність в шунтуванні виникає тільки при перенапрузі чи при переполюсуванні. Цей недолік усувається методами активного балансування, зокрема за допомогою схеми, наведеної на **рис. 4** [8].

Індуктивність первинної обмотки імпульсного зворотноходового трансформатора визначає кількість енергії, накопиченої в трансформаторі. Обмотка трансформатора  $w_2$  служить зворотнім зв'язком для збудження генерації імпульсів ке-

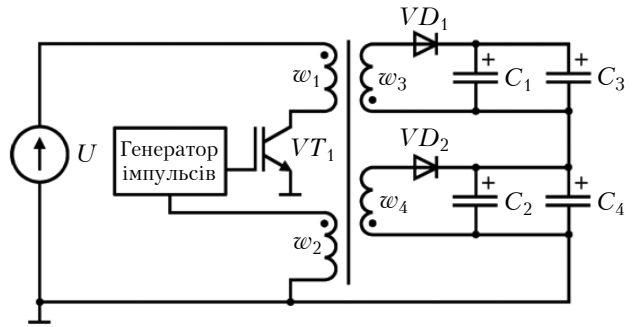


Рис. 4. Схема активного балансування

рування силовим ключем у схемі. Вторинні обмотки зворотного ходу  $w_3$  і  $w_4$  підключаються до елемента модуля через діоди  $VD1$  та  $VD2$ . Полярність підключення обмоток і діодів обирається таким чином, щоб не здійснювався вплив на процес накопичення енергії в трансформаторі. Після накопичення енергії первинною обмоткою трансформатора транзистор закривається за рахунок позитивного зворотного зв'язку, і на обмотках трансформатора змінюється полярність напруги. Починається другий такт роботи схеми, коли в первинному колі зникає струм, за рахунок взаємної індукції струм з'являється одночасно у вторинних обмотках. Оскільки напруга на елементах модуля є однаковою, значення падіння напруги на однотипних діодах теж можна вважати однаковими.

Амплітуди струму вторинних обмоток є однаковими, а їх сума дорівнює амплітуді струму первинної обмотки:

$$i_1 w_1 = i_3 w_3 + i_4 w_4, \quad (4)$$

де  $i_1$ ,  $i_3$ ,  $i_4$  — струм у відповідних обмотках трансформатора, а  $w_1$ ,  $w_3$ ,  $w_4$  — кількість витків в них.

За умови наявності різниці напруги на суперконденсаторах 0,2 В лише одна обмотка  $w_3$  приймає участь в процесі розмагнічення трансформатора. Рівень напруги 0,2 В відповідає напрузі відсічки діоду Шоткі, тому струм в діоді  $VD2$  відсутній. Амплітуда струму обмотки  $w_4$  дорівнює амплітуді струму вторинної обмотки, отже виконується рівність (4), оскільки струм в обмотці  $w_3$  дорівнює нулю. По мірі зменшення різниці напруги на суперконденсаторах, з'являється струм в обмотці  $w_3$ .

Отже, при розмагнічуванні трансформатора напруга на всіх обмотках з рівною кількістю витків є однаковою, а її значення визначається суперконденсатором з найменшою напругою і падінням напруги на діоді, через який протікає струм розмагнічування трансформатора. Така

особливість схеми зворотногоходового трансформатора дозволяє визначати мінімальну напругу на елементах в модулі послідовно з'єднаних суперконденсаторів за допомогою додаткової обмотки, яка має таку ж кількість витків, як і вторинні обмотки [8]. Точність балансування напруги в схемі визначається напругою відсічки діоду.

Схему, в якій енергія більш заряджених комірок використовується для зарядження комірок з нижчою напругою, представлено на **рис. 5**. Формування зарядного струму від промислової мережі забезпечує зарядний блок. Драйвери призначені для узгодження кола керування силовим ключем з системою управління, високочастотний інвертор — для паралельного живлення узгоджувальних трансформаторів для вирівнювання напруги між парними та непарними групами комірок задавального генератора, виконаного за схемою двофазного ШІМ-контролера.

Якщо напруга на будь-якому з суперконденсаторів модуля буде вищою або нижчою за середню напругу, то через обмотки узгоджувальних трансформаторів  $Tr1...Tr(n+1)$  та відкриті ключі  $K1...Kn$  почне протікати струм, що призведе до вирівнювання напруги на суперконденсаторах модуля. Інвертор працює синхронно з комутацією ключів і по чергові здійснює перезаряд парної та непарної групи комірок, вирівнюючи напругу між групами. В результаті роботи схеми напруга на комірках модуля вирівнюється і струм зменшується до мінімального значення. Струм в первинних обмотках трансформаторів знижується до значень, які визначаються втратами холостого ходу трансформаторів [9].

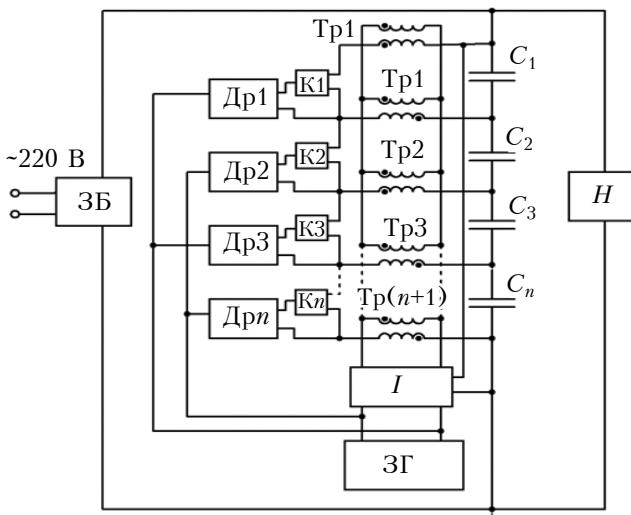


Рис. 5. Схема з використанням енергії більш заряджених комірок для заряду комірок з нижчою напругою: ЗБ — зарядний блок; Тр — узгоджувальні трансформатори; К — силові електронні ключі; Др — драйвери; ЗГ — задавальний генератор; І — високочастотний інвертор; Н — навантаження

Через розбіжності параметрів трансформаторів знижується точність балансування напруги модуля. Спочатку суперконденсаторний модуль заряджається не до максимальної напруги, оскільки через відхилення параметрів суперконденсаторів напруга на певному елементі модуля може перевищувати максимальну рекомендовану напругу при зарядженні до номінальної напруги самого модуля. Тому повне зарядження модуля відбувається в кілька етапів, оскільки схема вирівнює напругу між групами суперконденсаторів, а не контролює напругу кожного суперконденсатора окремо.

На **рис. 6** представлено розроблену авторами схему, яка позбавлена вказаного недоліку та дозволяє забезпечити повернення надлишкової енергії і більш високий рівень точності балансування напруги окремо для кожного суперконденсатора модуля. Схема відображує балансування двох сусідніх суперконденсаторів модуля. В загальному випадку для балансування модуля з  $N$  суперконденсаторів застосовується  $N$  ідентичних комірок балансування, підключених паралельно до кожного з них.

Розглянемо принцип дії схеми та призначення її елементів на прикладі комірки суперконденсатора  $C_{scap1}$ .

При досягненні напругою на суперконденсаторі  $C_{scap1}$  номінального значення відповідна система керування, що складається з компаратора  $DA1$ , ШІМ-контролера  $DA2$  та елементів їх обв'язки, дозволяє роботу розрядного перетворювача на транзисторі  $VT1$ . Після цього суперконденсатор  $C_{scap1}$  стає зашунтованим, а надлишкова енергія повертається в джерело через обмотку  $w_3$  трансформатора  $TV1$  та діод  $VD3$ . Такий процес триває до моменту досягнення на кожному суперконденсаторі модуля номінальної напруги. У цей момент блок керування зарядом (на схемі рис. 6 не показаний) забороняє роботу зворотногоходового перетворювача силової частини зарядного пристрою і суперконденсаторний модуль відключається від мережі.

Для керування рівнем напруги суперконденсатора  $C_{scap1}$  використовується схема компаратора з гістерезисом, яка включає елементи  $DA1$ ,  $VD1$ ,  $R1...R7$ . Стабілітрон  $VD1$  та резистори  $R3$ ,  $R4$ ,  $R6$  забезпечують на неінверсному вході компаратора опорну напругу, значення якої визначається як

$$U_{ref} = \frac{n+1}{n} U_{swt}, \quad (5)$$

де  $n$  — коефіцієнт співвідношення значень опору резистивного дільника компаратора;  
 $U_{swt}$  — напруга спрацювання компаратора.



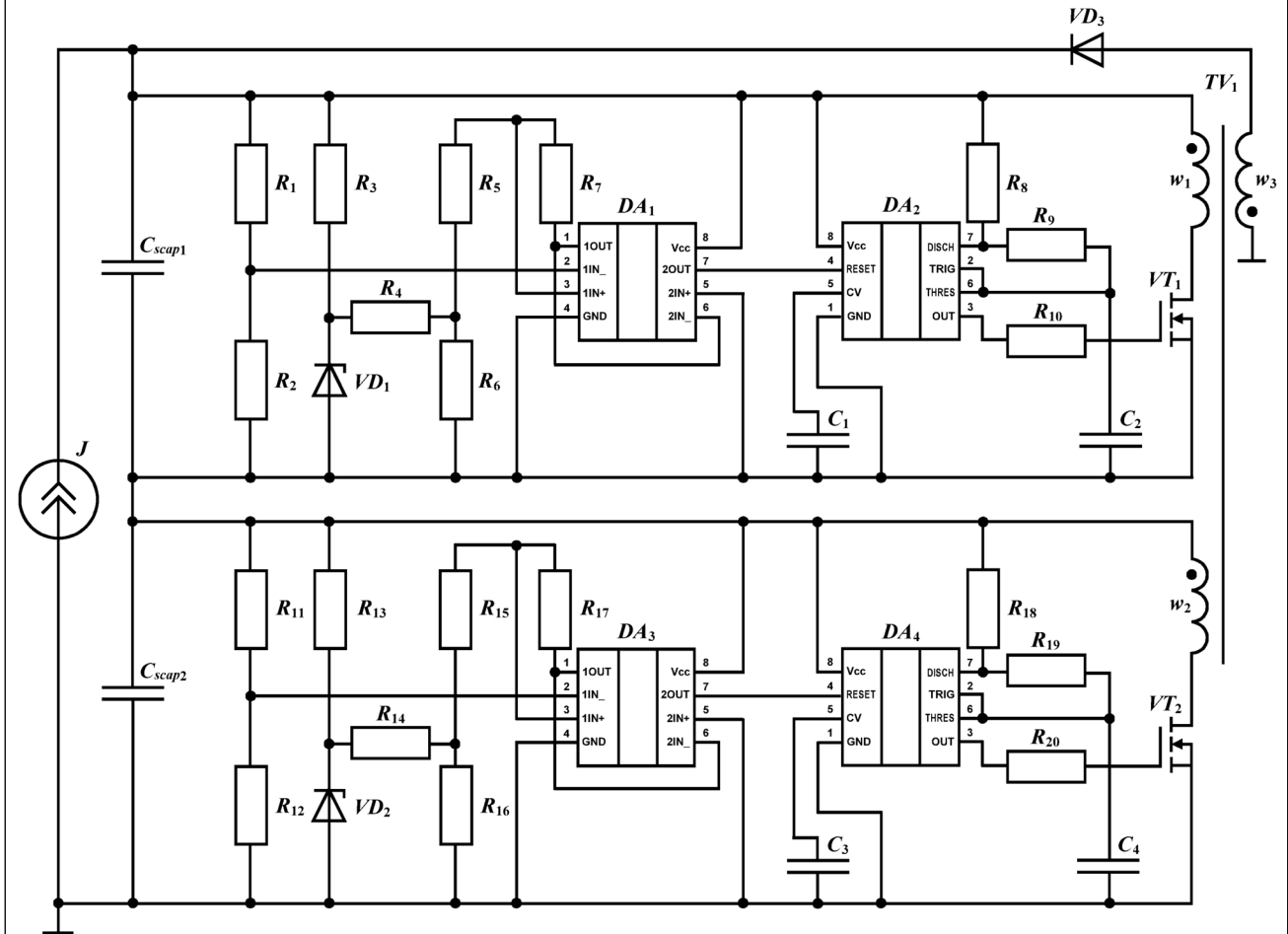


Рис. 6. Схема балансування двох сусідніх суперконденсаторів модуля з поверненням надлишкової енергії

Напруга спрацювання компаратора визначається як

$$U_{swt} = \frac{U_{Hswt} - U_{Lswt}}{2}, \quad (6)$$

де  $U_{Hswt}$ ,  $U_{Lswt}$  — відповідно, верхня та нижня межі спрацювання компаратора, що обираються згідно з вимогами до точності балансування напруги суперконденсаторного модуля.

Коефіцієнт  $n$  розраховується за допомогою виразу

$$n = \frac{U_{vcc+} - U_{vcc-}}{U_{hvs}} - 1, \quad (7)$$

де  $U_{vcc+}$ ,  $U_{vcc-}$  — напруга джерела живлення компаратора;

$U_{hys}$  – ширина петлі гістерезису компаратора,  $U_{hys} = U_{Hswt} - U_{Lswt}$ ;

$U_{Hswt}, U_{Lswt}$  – відповідно, верхня та нижня межі спрацювання компаратора.

Резистори  $R_5, R_7$  реалізують позитивний зворотний зв'язок. З дільника напруги  $R_1, R_2$  на інверсний вхід компаратора надходить напруга, пропорційна напрузі на суперконденсаторі  $C_{scap1}$ . Якщо ця напруга перевищить номіналь-

не значення, напруга на інверсному вході компаратора перевищить значення напруги на неінверсному вході, і на виході встановиться низький рівень напруги. Напруга з виходу 1OUT подається на інверсний вхід 1IN-. Таким чином, з виходу 2OUT інвертований сигнал подається на вхід RESET ШІМ-контролера, тим самим дозволяючи його роботу.

Частота генерування прямокутних імпульсів залежить від співвідношення величин опору резисторів  $R8$  і  $R9$  та ємності конденсатора  $C2$  і визначається як

$$f = (\ln 2 \cdot (R_8 + 2R) \cdot C_2)^{-1}, \quad (8)$$

де  $R_8, R_9$  — опір відповідних резисторів;  
 $C_2$  — ємність конденсатора  $C2$ .

## Імітаційне моделювання роботи комірки балансування напруги

Моделювання роботи схеми балансування суперконденсаторного модуля здійснено в пакеті LTSpice [10]. Схему розробленої моделі представлено на **рис. 7**, а її параметри — в **таблиці**. Як схемні елементи використано компоненти бібліотеки Component, Comparators, Misc.

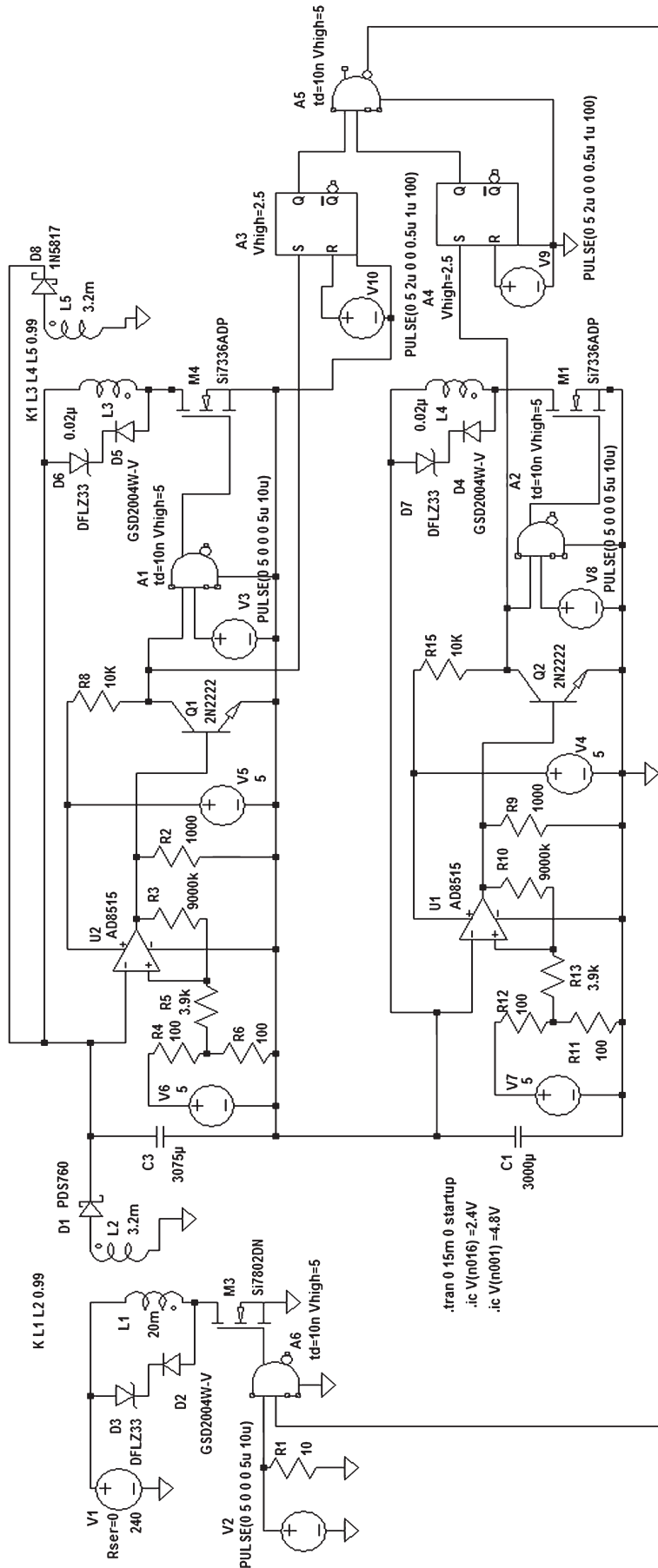


Рис. 7. Модель схеми балансування суперконденсаторного модуля, яку створено в пакеті LTspice

Параметри розробленої моделі

Напруга первинного джерела живлення, В	240
Частота перетворення, кГц	100
Напруга заряду модуля, В	5
Ємність суперконденсаторів модуля, Ф	350
Максимальний час балансування напруги суперконденсаторів модуля, мс	5
Відхилення напруги на суперконденсаторах, В	$\pm 0,08$

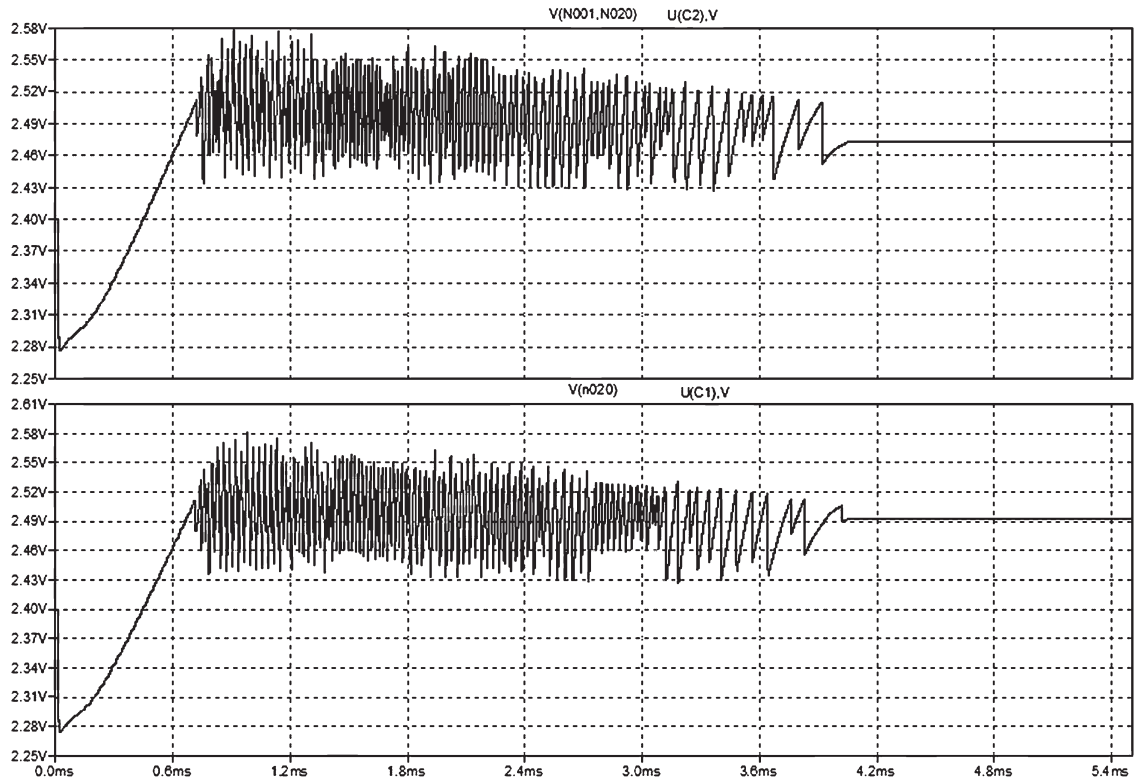


Рис. 8. Діаграми напруги на суперконденсаторах двох сусідніх комірок під час балансування

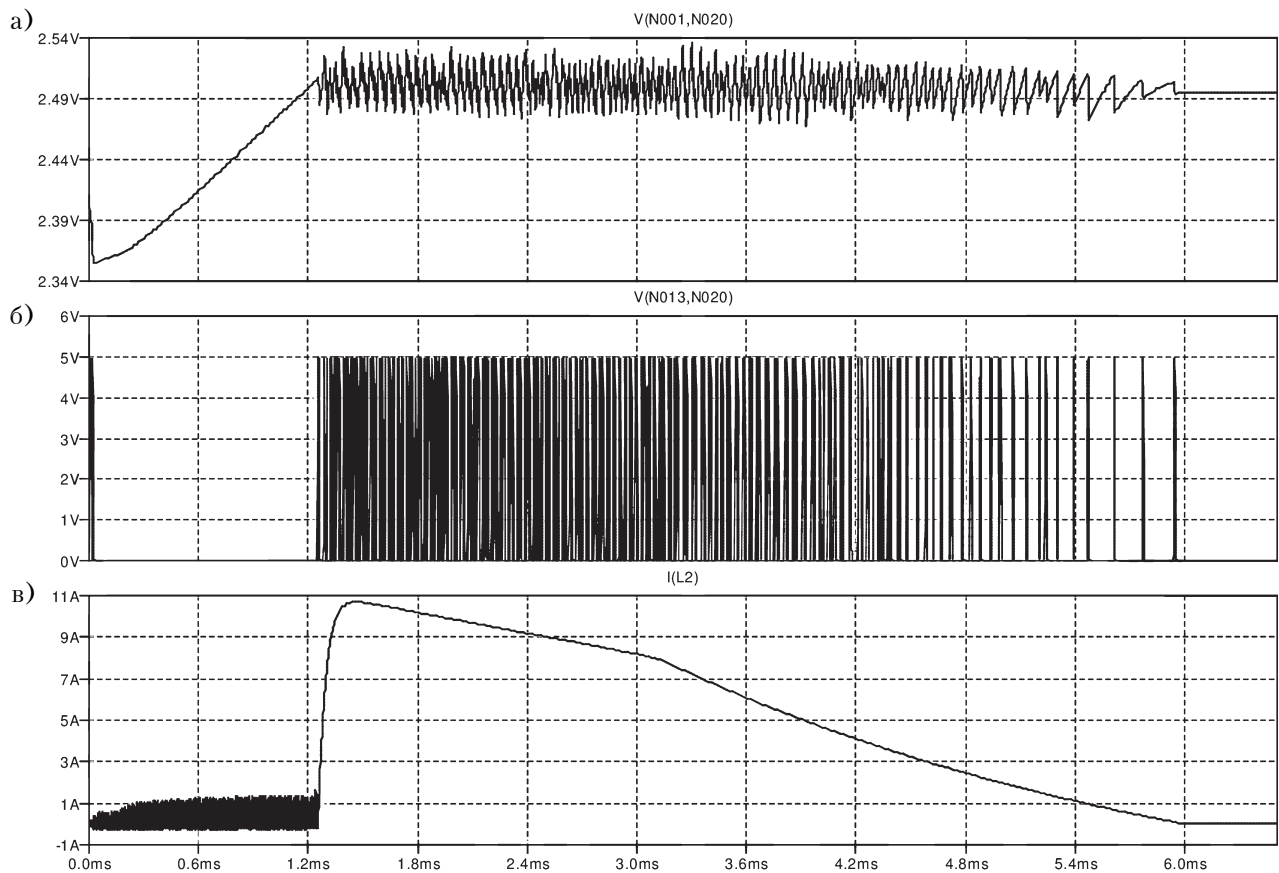


Рис. 9. Діаграми напруги на суперконденсаторі (а), напруги керування (б) та струму індуктивності L1 (в) під час балансування однієї комірки

На рис. 8 представлено отримані в результаті моделювання діаграми роботи наведених на рис. 6 двох сусідніх комірок, які підтверджують працездатність запропонованої схеми балансування, оскільки рівень напруги на суперконденсаторах не виходить за встановлені межі. З діаграм видно, що при досягненні напругою на суперконденсаторі 2,5 В починається процес балансування, суперконденсатори заряджаються і розряджаються в межах, які визначено шириною петлі гістерезису компаратора (рис. 9). Після встановлення на суперконденсаторі номінальної напруги починається процес балансування (рис. 9, а). На виході компаратора  $U_2$  встановлюється напруга низького рівня. Сигнал з виходу компаратора  $U_2$  (див. рис. 7) через інвертор на транзисторі  $Q_1$  подається на елемент  $A_1$ , з виходу якого на силовий ключ  $M_4$  подаються високочастотні сигнали керування (рис. 9, б). При відкритому ключі суперконденсатор  $C_3$  розряджається через обмотку  $L_3$ . Якщо суперконденсатор  $C_1$  теж зарядився до номінального значення, коло заряду модуля припиняє роботу під дією керуючого імпульсу системи контролю заряду, зібраної на елементах  $A_3, A_4, A_5, A_6$ .

Через активні втрати у напівпровідникових елементах схеми енергія, що була накопичена в обмотках трансформаторів  $K-L_1-L_2$  та  $K_1-L_3-L_4-L_5$ , поступово розсіюється і процес балансування припиняється (рис. 9, в).

### Висновки

Запропонована схема балансування напруги суперконденсаторного модулю показала свою працездатність та ефективність. Схема дозволяє із заданою точністю здійснювати вирівнювання напруги в модулях з  $N$ -ною кількістю суперконденсаторів, що підтверджено результатами моделювання. Перевагою запропонованого схемного рішення є можливість отримання високого коефіцієнту корисної дії, оскільки надлишкова енергія комірки модуля не розсіюється у вигляді тепла, а повертається до джерела живлення. Також перевагою такої схеми є те, що балансування напруги кожного суперконденсатора модуля здійснюється окремо, не-

залежно від стану інших, що запобігає передчасному старінню модуля та скороченню кількості зарядно-розрядних циклів.

Таким чином, запропонована схема балансування напруги може бути рекомендована для забезпечення ефективної роботи суперконденсаторного модуля при побудові джерел живлення з проміжним накопиченням енергії установок контактної мікрозварювання.

### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Бондаренко Ю.В. Багатокомірковий транзисторний перетворювач зі спільним використанням безперервного та імпульсного керування для контактної мікрозварювання / Дис. канд. техн. наук. — Алчевськ, 2012 — С. 148.
2. Bondarenko O.F., Bondarenko I.V., Safronov P.S., Sydorets V.M. Effective circuit topology of DC power supply for micro resistance welding // IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2014). — 2014. — P. 68–70. <http://dx.doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874204>
3. Сафронов П.С., Бондаренко Ю.В., Бондаренко О.Ф. та ін. Поліпшення електромагнітної сумісності джерел живлення для систем контактної зварювання // Технічна електродинаміка. — 2014. — № 5. — С. 89–91.
4. Балыкшов А. Ионисторы // Электронные компоненты. — 2005. — № 11. — С. 91–97.
5. Разуваев Ю.Ю., Чайка М.Ю., Агупов В.В. и др. Методы балансировки напряжений суперконденсаторных элементов // Вестник Воронежского государственного университета. — 2012. — № 7. — С. 101–105.
6. Keshmiri V., Westerberg D., Andersson Ersman P. et al. A silicon-organic hybrid voltage equalizer for supercapacitor balancing // IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst. — 2017. — Vol. 7, no. 1. — P. 114–122. <http://dx.doi.org/10.1109/JETCAS.2016.2612724>
7. Castano S., Gauchia L., Sanz-Feito J. Effect of packaging on supercapacitors strings modeling: proposal of functional unit defined around balancing circuit // IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol. — 2013. — Vol. 3, №. 8. — P. 1390–1398. <http://dx.doi.org/10.1109/TCPM.2013.2252956>
8. Сизов М. Устройство для выравнивания напряжений на элементах батареи суперконденсаторов // Современная электроника. — 2013. — № 1. — С. 40–43.
9. Korotynsky A.E., Drachenko N.P., Shapka V.A. Peculiarities of application of supercapacitors in devices for pulse welding technologies // The Paton Welding Journal. — 2014. — N 9. — P. 34–38. <http://dx.doi.org/10.15407/twpj2014.09.05>
10. Сохор Ю. Н. Моделирование устройств в пакете LTspice/SwCAD. — Псков: «Издательство ППИ», 2008.

Дата надходження рукопису  
до редакції 25.09 2017 р.

Ю. В. КОЖУШКО, к. т. н. А. Ф. БОНДАРЕНКО

Украина, Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»  
E-mail: kozhushko\_yullia@ukr.net, bondarenkoaf@gmail.com

## БАЛАНСИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ МОДУЛЬНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ МИКРОСВАРКИ

Предложено схемное решение для балансировки напряжения модульного накопителя энергии на основе суперконденсаторов источника питания для контактной микросварки. Приведены формулы для расче-



та узлов управления отдельной ячейки суперконденсаторного модуля. Проведено моделирование работы схемы балансировки напряжения модуля и получены временные диаграммы процесса заряда суперконденсатора. Подтверждены работоспособность и эффективность предложенного решения.

**Ключевые слова:** контактная микросварка, накопитель энергии, суперконденсатор, балансировка напряжения, импульсный преобразователь.

DOI: 10.15222/TKEA2017.4-5.15  
UDC 669.054

Yu. V. KOZHUSHKO, O. F. BONDARENKO

Ukraine, National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»  
E-mail: kozhushko\_yullia@ukr.net, bondarenkoaf@gmail.com

## BALANCING VOLTAGE OF MODULAR ENERGY STORAGE POWER SOURCE FOR CONTACT MICROWELDING

*Micro resistance welding is one of the most effective ways to obtain permanent joints of metal parts. The quality of welded joints strongly depends on the characteristics of the power supply of welding equipment. The power supplies for micro resistance welding based on Energy Storage topology have a softer impact on the network than the ones based on Direct Energy topology. The use of supercapacitors for Energy Storage type power supplies makes it possible to reduce the dimensions of welding equipment and to improve its technical parameters. However, the feature of the supercapacitors is low value of the nominal voltage, which usually does not exceed 3 V. To provide higher voltage, the modules of supercapacitors connected in series are designed. In order to extend the life time of such modules, a voltage balancing system is required.*

*A circuit for balancing the voltage of a modular supercapacitor energy storage of a power supply for micro resistance welding is proposed. The fragments of calculation of control units of a supercapacitor module cell are given. The simulation of the balancing circuit operation is carried out and time charts of the supercapacitor charge process are obtained. The operability and effectiveness of the proposed solution is confirmed. The advantage of the proposed circuit is the possibility of obtaining the high efficiency because of returning the excessive energy of the module cell back into the power supply.*

**Key words:** micro resistance welding, energy storage, supercapacitor, voltage balancing, pulse converter.

### REFERENCES

1. Bondarenko Iu.V. *Multicell-type transistor converter with combined continuous and pulse control for micro resistance welding*, Ph. D. thesis. Alchevsk, 2012, p. 148. (Ukr)
2. Bondarenko O.F., Bondarenko I.V., Safronov P.S., Sydorets V.M. Effective circuit topology of dc power supply for micro resistance welding. *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kiev, Ukraine, 2014. <http://dx.doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874204>
3. Safronov P.S., Bondarenko Iu.V., Bondarenko O.F., Sydorets V.M., Kucherenko D.V. Increase of electromagnetic compatibility of power supplies for resistance welding. *Technical Electrodynamics*, 2014, no. 5, pp. 89-91. (Ukr)
4. Balykshov A. [Ionistors]. *Elektronnye komponenty*, 2005, no. 11, pp. 91-97. (Rus)
5. Razuvaev Yu.Yu., Chajka M.Yu., Agupov V.V., Gorshkov V.S., Silyutin D.E. [Methods of voltage balancing for the supercapacitors]. *Vestnik of Voronezh State Technical University*, 2012, no. 7-2, pp. 101-105. (Rus)
6. Keshmiri V., Westerberg D., Andersson Ersman P., Sandberg M., Forchheimer R., Tu D. A silicon-organic hybrid voltage equalizer for supercapacitor balancing. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 114-122. <http://dx.doi.org/10.1109/JETCAS.2016.2612724>
7. Castano S., Gauchia L., Sanz-Feito J. Effect of Packaging on Supercapacitors Strings Modeling: Proposal of Functional Unit Defined Around Balancing Circuit. *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, 2013, vol. 3, no. 8, pp. 1390-1398. <http://dx.doi.org/10.1109/TCPMT.2013.2252956>
8. Sizov M. [The device for equalizing the voltages on the cells of a supercapacitor battery]. *Modern electronics*, 2013, no. 1, pp. 40-43. (Rus)
9. Korotynsky A.E., Drachenko N.P., Shapka V.A. Peculiarities of application of supercapacitors in devices for pulse welding technologies. *The Paton Welding Journal*, 2014, no. 9, pp. 34-38. <http://dx.doi.org/10.15407/tpwj2014.09.05>
10. Sokhor Yu.N. [Device simulation using LTspice/SwCAD software]. Publishing House of PPI, Pskov, Russia, 2008, p. 165. (Rus)

Д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, Д. В. КОЗАК

Украина, Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

E-mail: yunikola@ukr.net

## ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ С РЕЗЬБОВОЙ КАПИЛЛЯРНОЙ СТРУКТУРОЙ

*Приведены результаты экспериментального исследования термического сопротивления алюминиевой гравитационной тепловой трубы (ТТ) с резьбовой капиллярной структурой с изобутаном в качестве теплоносителя в условиях отвода теплоты свободной конвекцией воздуха. Дано сравнение значений термического сопротивления рассматриваемой ТТ с алюминиевым термосифоном таких же размеров, имеющим гладкую поверхность корпуса в зоне испарения. Показано, что в области значений подводимого теплового потока от 5 до 50 Вт термическое сопротивление гравитационной ТТ существенно ниже, чем термосифона. Исследования были проведены как без использования радиаторов, так и при установке одного, двух и трех радиаторов в зоне конденсации теплопередающих устройств.*

**Ключевые слова:** тепловая труба, резьбовая капиллярная структура, изобутан, термическое сопротивление, электронная аппаратура, светодиодный осветительный прибор.

Современная электронная аппаратура и приборы полупроводниковой светотехники на основе светодиодных источников света характеризуются повышенным удельным тепловыделением [1, 2]. Увеличение мощности и плотности теплового потока, выделяемого электронными компонентами, приводит к повышению температуры и, как следствие, к снижению надежности работы как самих электронных компонентов, так и электронной аппаратуры в целом. Для обеспечения нормального теплового режима электронных компонентов используются различные теплоотводящие устройства и системы [3–5]. Особое место среди них занимают двухфазные теплопередающие устройства — тепловые трубы и термосифоны [6–8], которые обладают в десятки и сотни раз большей эквивалентной теплопроводностью, чем металлы [9, с. 17]. Это объясняется тем, что в двухфазных теплопередающих устройствах передача теплоты осуществляется с помощью высокоэффективного замкнутого цикла преобразования теплоносителя (испарение — конденсация) внутри герметичного корпуса устройства.

В классических тепловых трубах (ТТ) для возврата жидкого теплоносителя из зоны конденсации в зону испарения на внутренней поверхности корпуса имеется слой капиллярной структуры. Другими его функциями являются распределение теплоносителя по поверхности теплообмена, интенсификация теплообме-

на в зоне испарения за счет увеличения количества потенциальных центров парообразования и стабилизация процесса кипения. Наиболее распространенными типами капиллярной структуры являются слои из металлических сеток [10, с. 69–82], спеченных металлических порошков [11] или волокон [12] и капиллярные канавки той или иной формы, выполненные на стенке корпуса тепловой трубы методом экструзии [13] или лазерным излучением [14]. Получение слоя капиллярной структуры является достаточно сложной и трудоемкой технологической операцией при изготовлении ТТ.

В отличие от тепловых труб, на внутренней поверхности корпуса термосифона слой капиллярной структуры обычно не выполняют, и поверхность стенки корпуса в зоне испарения остается гладкой, что существенно упрощает конструкцию и технологию изготовления термосифонов, однако делает невозможной работу термосифона против силы гравитации, когда зона испарения располагается выше зоны конденсации. Кроме того, по сравнению с капиллярной структурой количество потенциальных центров парообразования на гладкой поверхности намного меньше, а следовательно, меньшая интенсивность теплообмена, большее термическое сопротивление и нестабильность процесса кипения в зоне испарения.

Если конструкция электронной аппаратуры или светодиодного осветительного прибора по-

звляет расположить теплопередающее устройство так, чтобы зона испарения располагалась ниже зоны конденсации, то в таких случаях наиболее предпочтительным представляется использование гравитационной тепловой трубы [15, с. 51, 72]. В гравитационной ТТ слой капиллярной структуры можно выполнять только в зоне испарения [16], поскольку возврат теплоносителя из зоны конденсации осуществляется за счет силы гравитации. Основным назначением слоя капиллярной структуры здесь является интенсификация процесса теплообмена в зоне испарения и стабилизация процесса кипения. В этом случае представляется возможным упростить конструкцию и технологию изготовления слоя капиллярной структуры и снизить стоимость тепловой трубы.

В НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» разработана новая конструкция гравитационной тепловой трубы с резьбовой капиллярной структурой в зоне испарения [17], которую можно изготавливать на существующих предприятиях машино- или приборостроительного профиля без использования высокотемпературных технологических процессов и специализированного технологического оборудования. Первые экспериментальные исследования гравитационной ТТ с резьбовой капиллярной структурой, корпус которой был изготовлен из меди, а в качестве теплоносителя использовался хладон 141b, были проведены нами ранее. В [18, 19] было показано, что термическое сопротивление такой тепловой трубы меньше, чем у гладкостенного термосифона таких же размеров: в 2,0–4,4 раза при сво-

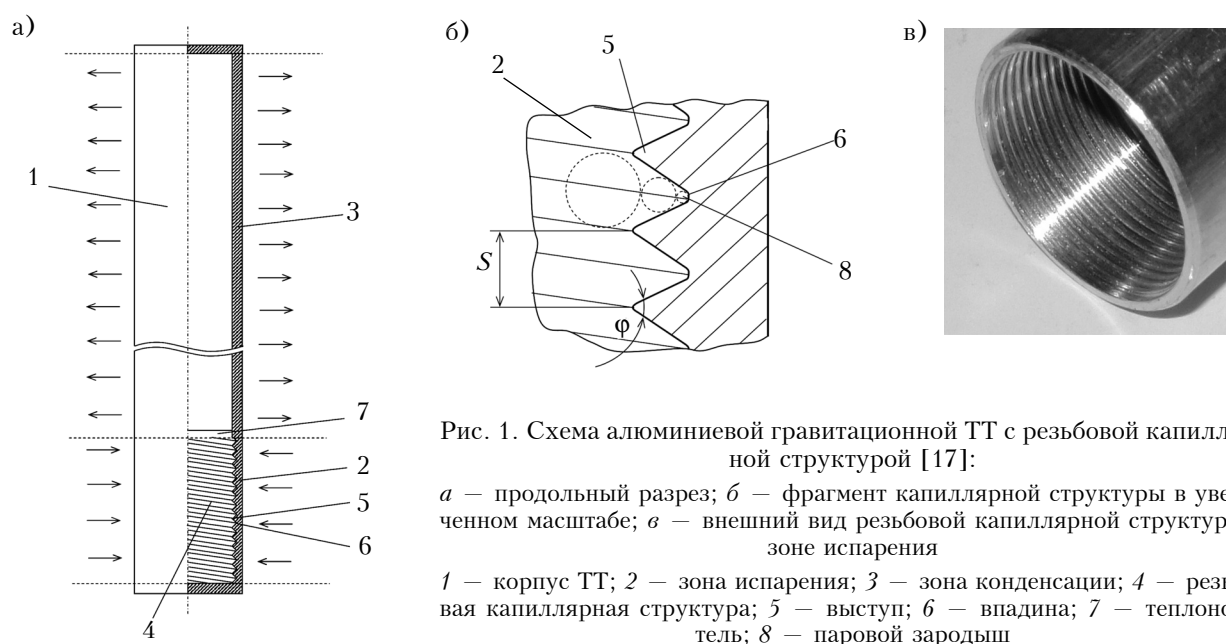
бодной конвекции воздуха и в 1,2–1,3 раза при вынужденной. Ее недостатком является высокая масса, обусловленная использованием меди для изготовления корпуса.

С целью снижения массы и стоимости гравитационной тепловой трубы с резьбовой капиллярной структурой можно использовать относительно дешевые и легкие материалы, например алюминиевые сплавы. Вместе с тем, тепловые характеристики таких ТТ, в первую очередь термическое сопротивление, до настоящего времени не были исследованы. Наличие таких данных могло бы помочь проектированию систем отвода тепла от электронных компонентов, в частности, перспективных энергоэффективных бытовых светодиодных осветительных приборов (люстр), каркас которых выполнен на основе алюминиевых гравитационных тепловых труб, а в качестве источника света используются объемные светодиодные модули, устанавливаемые в зоне испарения тепловых труб [20, 21].

Целью данной работы является экспериментальное исследование термического сопротивления алюминиевой гравитационной тепловой трубы с резьбовой капиллярной структурой и его сравнение с термическим сопротивлением гладкостенного термосифона тех же размеров.

### Конструкция экспериментального образца

Для проведения исследований был разработан и изготовлен экспериментальный образец алюминиевой гравитационной тепловой трубы, схема которой приведена на рис. 1. Корпус ТТ изготовлен из алюминиевого сплава АД 31. Длина ТТ — 830 мм, зоны испарения — 50 мм,



зоны конденсации — 620 мм, внешний диаметр ТТ — 12 мм, внутренний — 9 мм. На внутренней поверхности стенки корпуса в зоне испарения на длине 55 мм нарезана мелкая метрическая резьба с углом при вершине ее выступов  $\varphi = 60^\circ$ . Диаметр резьбы составлял 10 мм, шаг  $S = 0,5$  мм. Остальная поверхность внутренней стенки корпуса оставалась гладкой. В качестве теплоносителя выбран экологически безопасный теплоноситель R600a — изобутан (химическая формула  $(\text{CH}_3)_3\text{CH}$ , температура кипения составляет  $-11,7^\circ\text{C}$  при нормальных условиях).

### Экспериментальная установка и методика проведения исследований

Экспериментальная установка (рис. 2) включала в себя рабочий участок (на рис. 2, а — в центре), систему регулируемого подвода и измерения теплового потока (см. там же слева) и многоканальную систему автоматизированного измерения и отображения температурного поля в виде графических зависимостей и табличного файла на экране монитора персонального компьютера (см. там же справа).

Для подвода теплового потока к зоне испарения ТТ использовался объемный электрический нагреватель на основе алмазоподобных пленок, позволяющий рассеивать электрическую мощность величиной до 806 Вт. Участки подвода и отвода теплоты на рис. 1, а показаны стрелками. Наружные поверхности электрического нагревателя и тепловой трубы в области зоны испарения тщательно покрывались несколькими слоями стеклоткани и базальтовым войлоком. Для максимального исключения тепловых потерь в окружающую среду зону испарения с установленным на ней электрическим нагревателем помещали в стеклянный сосуд с полыми вакуумированными стенками, выполненный в виде термоса.

Рабочий участок (рис. 2, б) представлял собой алюминиевую тепловую трубу описанной выше конструкции с установленными на ней электрическим нагревателем и термоэлектрическими преобразователями (термопарами). В процессе исследований ТТ закреплялась на лабораторном штативе вертикально в двух положениях: когда внизу располагалась зона испарения с резьбовой капиллярной структурой, и наобо-

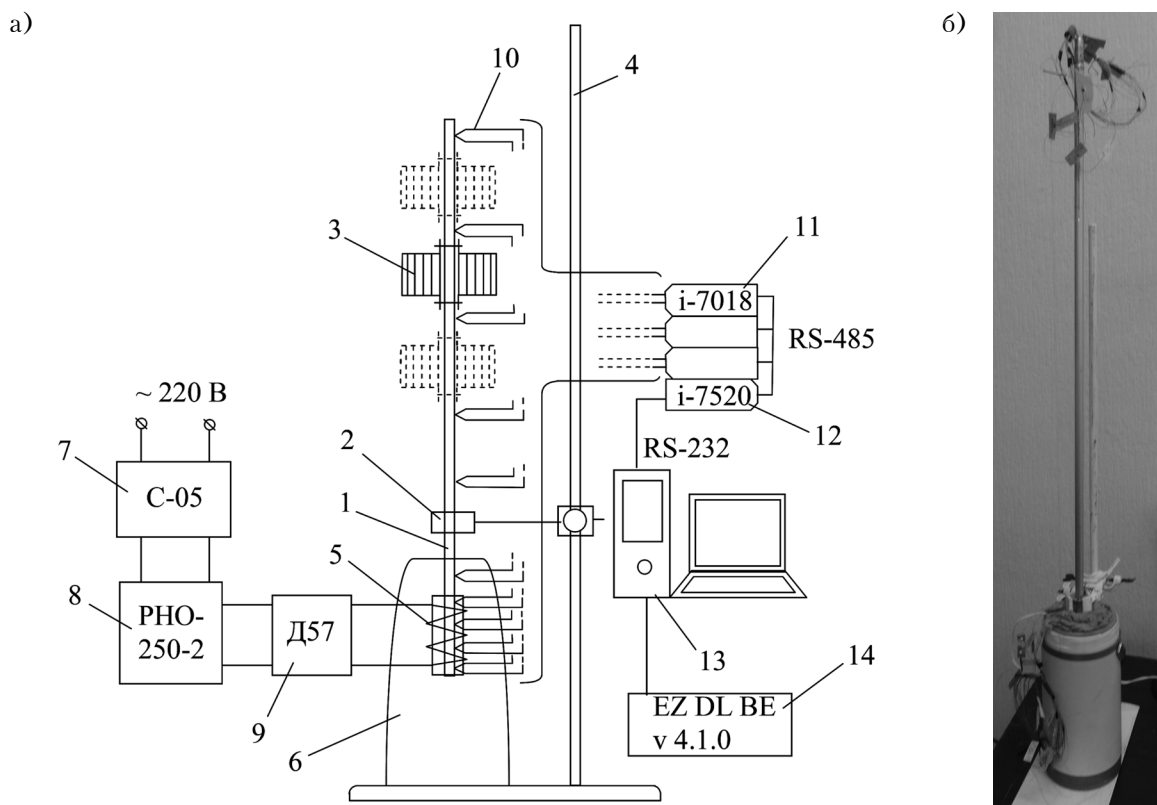


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки (а) и внешний вид рабочего участка с гравитационной ТТ без радиатора (б):

1 — тепловая труба; 2 — держатель; 3 — радиатор; 4 — лабораторный штатив; 5 — электрический нагреватель; 6 — вакуумная теплоизоляция (термос); 7 — стабилизатор напряжения; 8 — регулятор напряжения; 9 — ваттметр; 10 — термопары; 11 — АЦП; 12 — преобразователь интерфейсов; 13 — персональный компьютер; 14 — программное обеспечение



рот — когда внизу располагалась гладкая поверхность. Таким образом, одно и то же теплопередающее устройство в первом случае выполняло роль алюминиевой гравитационной тепловой трубы (АГТТ), во втором — гладкостенного термосифона. Это повышало степень достоверности результатов сравнения полученных значений термического сопротивления этих устройств, поскольку они имели не только одинаковые размеры, но и объем заполнения теплоносителем, степень предварительной очистки внутренней поверхности корпуса, вакуумирования и дегазации внутренней полости устройства, качества смачивания внутренней поверхности стенок теплоносителем и т. п.

Для исследования влияния условий внешнего охлаждения на термическое сопротивление теплопередающего устройства конструкция рабочего участка предусматривала возможность установки на теплопередающее устройство в зоне конденсации от одного до трех ребристых радиаторов. Площадь теплоотдающей поверхности радиатора составляла 1200 см<sup>2</sup>, его высота — 60 мм, диаметр — 87 мм. Внутри радиатора было выполнено сквозное отверстие диаметром 12 мм. Конструктивно радиатор состоял из двух симметричных составных частей, которые устанавливались вокруг теплопередающего устройства и стягивались с помощью двух хомутов. Контактные поверхности радиатора и теплопередающего устройства предварительно смазывались теплопроводной пастой КПТ-8.

Система обеспечения и измерения электрической мощности состояла из стабилизатора напряжения типа С-0,5 и регулятора напряжения типа РНО-250-2 (220 В, 9 А). Электрическая мощность измерялась с помощью ваттметра типа Д 57 класса точности 0,1.

Система измерения температурного поля состояла из 17 медь-константановых термопар (диаметр медных электродов — 0,2 мм, константановых — 0,16 мм). В зоне испарения было установлено четыре термопары, в зоне транспорта — одна, в зоне конденсации — десять. Одна термопара с помощью гильзы была введена в паровое пространство, еще одна предназначалась для измерения температуры окружающего воздуха (на рис. 2 размещение термопар показано условно, без привязки к конкретному месту их установки). Электроды термопар подключались к трем восьмиканальным аналого-цифровым преобразователям сигналов модели i-7018 (производитель — ICP CON) с преобразователем интерфейсов модели i-7520. Преобразователь интерфейсов подключался к персональному компьютеру с помощью интерфейса типа RS 232/USB.

Методика проведения исследований предусматривала выполнение четырех серий экспериментов и для АГТТ, и для термосифона. В первой серии экспериментов определялось термическое сопротивление устройств без использования радиаторов. Далее проводились три серии измерений при установке в зоне конденсации поочередно одного, двух и трех радиаторов с последующим определением термического сопротивления в широком диапазоне изменения подводимого теплового потока.

Значение термического сопротивления  $R$  определялось как отношение значения перепада температуры  $\Delta t$  по длине теплопередающего устройства к значению подводимого теплового потока  $Q$ . Значение  $\Delta t$  определялось как разность средних значений температуры корпуса в зонах испарения и конденсации в установившемся стационарном тепловом режиме. Значение подводимого теплового потока  $Q$  устанавливалось с помощью регулятора напряжения ступенчато, с шагом 2,5 или 5 Вт (в зависимости от серии экспериментов), и принималось равным значению электрической мощности, потребляемой нагревателем. Основанием для такого допущения послужили описанные выше мероприятия, направленные на минимизацию тепловых потерь. Величину подводимого теплового потока изменяли от 5 Вт до значения, при котором начинали проявляться кризисные явления в теплопередающем устройстве, сопровождающиеся резким увеличением температуры стенки корпуса в зоне испарения и соответствующим ростом термического сопротивления.

Отвод теплоты от зоны конденсации двухфазного теплопередающего устройства осуществлялся свободной конвекцией окружающего воздуха, температура которого находилась в пределах  $15,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$ .

Минимальное значение термического сопротивления теплопередающего устройства соответствует максимальному передаваемому тепловому потоку, величину которого находили с использованием графических зависимостей  $R = f(Q)$ .

### Результаты экспериментального исследования

Анализ представленной на рис. 3 графической зависимости термического сопротивления  $R$  алюминиевой гравитационной тепловой трубы, заправленной изобутаном, от передаваемого теплового потока  $Q$  в условиях свободной конвекции воздуха показывает, что с увеличением  $Q$  термическое сопротивление ТТ падает как в отсутствие радиаторов, так и при их наличии. При малых значениях теплового потока теплообмен в зоне испарения осуществляется в основ-

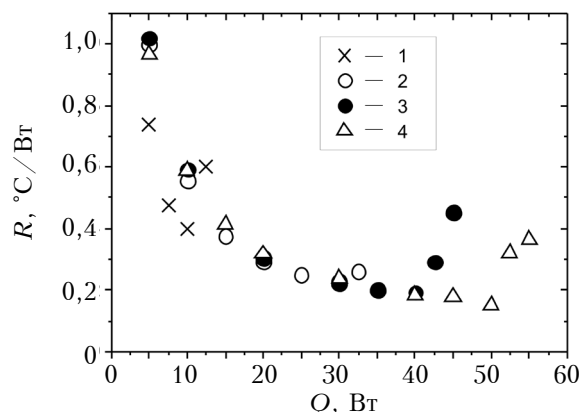


Рис. 3. Зависимость термического сопротивления заправленной изобутаном АГТТ с резбовой капиллярной структурой от теплового потока в отсутствие радиатора (1) и при наличии одного (2), двух (3) и трех (4) радиаторов

ном путем теплопроводности и конвекции теплоносителя, что обуславливает высокое значение термического сопротивления ТТ. С ростом подводимого теплового потока происходит переход от режима испарения к режиму кипения теплоносителя, при котором интенсивность теплообмена повышается, что приводит к существенному снижению термического сопротивления те-

Количество радиаторов в зоне конденсации	Термическое сопротивление АГТТ, °C/Вт, в режиме:		Максимальный тепловой поток, передаваемый АГТТ, Вт
	испарения ( $Q = 5$ Вт)	кипения	
—	0,74	0,40	10
1	0,97	0,23	30
2	1,02	0,19	40
3	1,0	0,15	50

пловой трубы (см. **таблицу**). Далее начинается его резкий рост, обусловленный проявлением кризисных явлений тепломассопереноса в тепловой трубе.

О большей эффективности алюминиевой гравитационной тепловой трубы с резбовой капиллярной структурой по сравнению с гладкостенным термосифоном тех же размеров можно судить по экспериментально полученным графическим зависимостям, приведенным на **рис. 4**.

Как видно из рис. 4, а, в отсутствие радиатора термическое сопротивление ТТ на 54,7–61,3% ниже, чем у гладкостенного термосифона, при

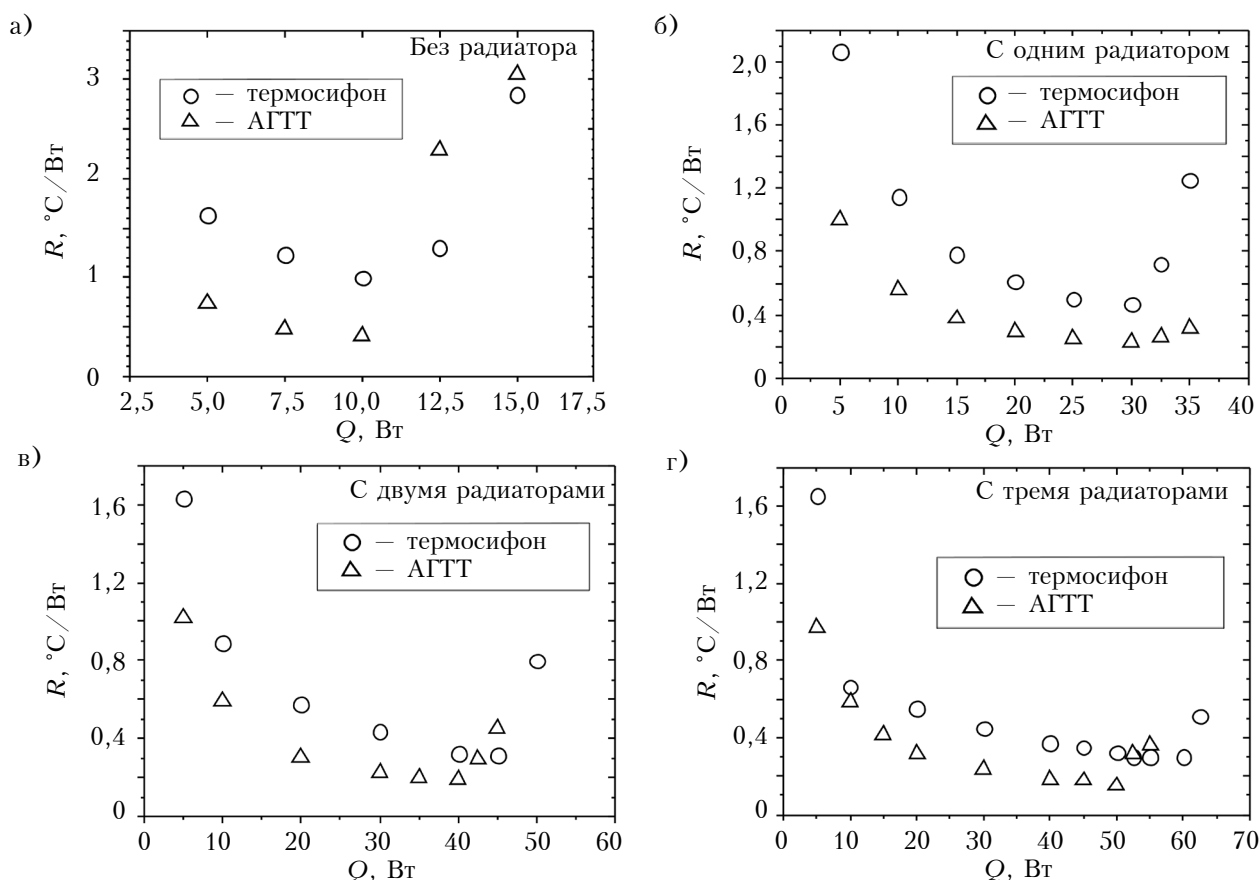


Рис. 4. Зависимость термического сопротивления  $R$  термосифона и АГТТ от теплового потока  $Q$  без радиатора (а) и с радиаторами (б–г)

изменении величины теплового потока вплоть до наступления кризисных явлений. Такую существенную разницу можно объяснить тем, что на теплообменной поверхности с резьбовой капиллярной структурой условия для образования паровых зародышей более благоприятные, чем на гладкой поверхности. Потенциальными центрами парообразования на резьбовой поверхности являются преимущественно впадины (см. рис. 1, б), поскольку в этой области теплоноситель является наиболее перегретым благодаря теплоте, подводимой к нему как от стенки корпуса, так и от окружающих выступов (паровые пузырьки на рис. 1, б условно обозначены пунктирными окружностями). Увеличение количества центров парообразования приводит к интенсификации процесса теплообмена при кипении и снижению термического сопротивления тепловой трубы по сравнению с гладкостенным термосифоном.

При использовании одного радиатора термическое сопротивление гравитационной тепловой трубы с резьбовой капиллярной структурой на 50,1–52,0% меньше, чем гладкостенного термосифона, при подводимом тепловом потоке 5–30 Вт (рис. 4, б). При установке двух радиаторов значения  $R$  АГТТ и термосифона отличаются на 33,4–49,2% в диапазоне  $Q = 5–40$  Вт (рис. 4, в), а при установке трех радиаторов — на 11,9–51,2% в диапазоне  $Q = 5–50$  Вт (рис. 4, г). То есть, использование радиаторов в некоторой степени снижает выигрыш от применения АГТТ по сравнению с термосифоном, однако во всех рассмотренных случаях этот выигрыш остается достаточно существенным.

### Выводы

1. В диапазоне значений подводимого теплового потока от 5 до 50 Вт термическое сопротивление исследованной алюминиевой гравитационной тепловой трубы с резьбовой капиллярной структурой в условиях свободной конвекции воздуха существенно ниже термического сопротивления алюминиевого гладкостенного термосифона таких же размеров, а значит, ее использование в теплоотводящих системах позволит снизить температуру охлаждаемых электронных компонентов.

2. Использование алюминиевых гравитационных тепловых труб с резьбовой капиллярной структурой вместо медных тепловых труб таких же размеров с традиционными капиллярными структурами (сетки, спеченные медные порошки и волокна) позволит в 3,3 раза снизить массу тепловых труб и уменьшить их стоимость за счет упрощения изготовления капиллярной структуры.

3. Алюминиевые гравитационные тепловые трубы с резьбовой капиллярной структурой можно рекомендовать, в частности, в качестве теплоотводящих устройств для мощных светодиодных осветительных приборов.

4. Тепловая труба исследованной конструкции без радиатора в условиях свободной конвекции воздуха может передавать тепловой поток до 10 Вт включительно, при установке одного радиатора с площадью поверхности 0,12 м<sup>2</sup> — до 30 Вт, с двумя такими радиаторами — до 40 Вт, с тремя — до 50 Вт включительно.

5. Простота конструкции предложенной капиллярной структуры обеспечивает высокую технологичность изготовления таких тепловых труб в условиях существующих машино- или приборостроительных предприятий.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Wei J. Hybrid Cooling technology for large-scale computing systems: from back to the future // ASME 2011 Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Systems, MEMS and NEMS. Vol. 2. — Portland, Oregon, USA, July 2011. <http://dx.doi.org/10.1115/IPACK2011-52045>

2. Дорожкин Ю., Туркин А., Червинский М. Новые семейства светодиодных модулей серии СХА компании Cree // Полупроводниковая светотехника. — 2014. — №1. — С. 36–39.

3. Ping H. Chen, Shyy W. Chang, Kuei F. Chiang, Ji Li. High Power Electronic Component: Review // Recent Patents on Engineering. — 2008. — Vol. 2, issue 3. — P. 174–188. <http://dx.doi.org/10.2174/187221208786306270>

4. Sukhvinder S. Kang. Advanced cooling for power electronics // International Conference on Integrated Power Electronics Systems CIPS. — Nuremberg, Germany. — 2012. — P. 1–8. <https://www.aavid.com/sites/default/files/news/Aavid-Liquid-Cooling-Advances-CIPS-2012.pdf>

5. Jing Wanga, Xin-Jie Zhao, Yi-Xi Cai, Chun Zhang, Wei-Wei Bao. Experimental study on the thermal management of high-power LED headlight cooling device integrated with thermoelectric cooler package // Energy Conversion and Management. — 2015. — Vol. 101. — P. 532–540. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.040>

6. Khairnasov S., Naumova A. Heat pipes application in electronics thermal control systems // Frontiers in Heat Pipes (FHP). — 2015. — Vol. 6, iss. 6. — P. 1–14. <http://dx.doi.org/10.5098/fhp.6.6>

7. Masataka Mochizuki, Thang Nguyen, Koichi Mashiko et al. A review of heat pipe application including new opportunities // Frontiers in Heat Pipes (FHP). — 2011. — Vol. 2, 013001. — P. 1–15. <http://dx.doi.org/10.5098/fhp.v2.1.3001>

8. A. Shanmuga Sundaram, Anirudh Bhaskaran. Thermal Modeling of thermosyphon integrated heat sink for CPU cooling // Journal of Electronics Cooling and Thermal Control. — 2011. — Vol. 1. — P. 15–21. <http://dx.doi.org/10.4236/jectc.2011.12002>

9. Ивановский М. Н., Сорокин В. П., Ягодкин И. В. Физические основы тепловых труб. — Москва: Атомиздат, 1978.

10. Смирнов Г. Ф., Бурдо О. Г. Моделирование процессов в тепловых трубах и термосифонах. — Одесса: «Полиграф», 2012.

11. Vasiliev L. L. Micro and miniature heat pipes- Electronic component cooler // Appl Therm Eng. – 2008. – Vol. 28. – P. 266–273. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.023>
12. Kravets V., Alekseik Ye., Alekseik O. et al. Heat pipes with variable thermal conductance property for space applications // Journal of Mechanical Science and Technolog. – 2017. – Vol. 31. – N 6. – P. 2613–2620. <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-017-0503-8>
13. Rassamakin B., Khairnasov S., Anisimova A. Thermal performance of aluminium grooved heat pipes // 2016 IEEE International Conference on Electronics and Information Technology (EIT'16). Conference Proceeding. – 2016. – Ukraine, Odessa. – P. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1109/ICEAIT.2016.7500979>
14. Николаенко Ю. Е., Ротнер С. М. Использование лазерного излучения для формирования капиллярной структуры плоских керамических тепловых труб // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38, вып 23. – С. 25–30. <http://journals.ioffe.ru/articles/14524>
15. Васильев Л. Л., Вааз С. Л., Киселев В. Г., и др. Низкотемпературные тепловые трубы. – Минск: Наука и техника. 1976.
16. Ji Li, Wenkai Tian, Lucang Lv. A thermosyphon heat pipe cooler for high power LEDs cooling // Heat Mass Transfer. – 2016. – Vol. 52, issue 8. – P. 1541–1548. <http://dx.doi.org/10.1007/s00231-015-1679-z>
17. Пат. 109840 України. Гравітаційна тепла труба // НТУУ «КПІ» / Ю. Є. Ніколаєнко. – 2016. – Бюл. №17. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19508>
18. Kozak D. V., Nikolaenko Yu. E. The Working characteristics of two-phase heat transfer devices for LED modules // 2016 IEEE International Conference on Electronics and Information Technology (EIT'16). Conference Proceeding. – 2016. – Ukraine, Odessa. – P. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1109/ICEAIT.2016.7500980>
19. Козак Д. В., Николаенко Ю. Е. Термическое сопротивление гравитационной тепловой трубы с резьбовидной капиллярной структурой // Матеріали XIV МНПК «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – Т. 1. – С. 81. [http://tef.kpi.ua/rub\\_334.htm](http://tef.kpi.ua/rub_334.htm)
20. Пат. 81688 України. Світлодіодний освітлюваний пристрій // НТУУ «КПІ» / Ю. Є. Ніколаєнко, Б. М. Рассамакін, С. М. Хайрнасоев. – 2013. – Бюл. № 13. <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=view&details&IdClaim=189034>
21. Николаенко Т. Ю., Николаенко Ю.Е. Новые схемно-технические решения для теплового конструирования люстр со светодиодами // Светотехника. – 2015. – № 2. – С. 48–50. <http://nprpss.ru/public/images/Svetotekhnika/201502-2.3.pdf>

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 10.10 2017 г.*

*Д. т. н. Ю. Є. НІКОЛАЄНКО, Д. В. КОЗАК*

Україна, Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
E-mail: yunikola@ukr.net

## ТЕРМІЧНИЙ ОПІР АЛЮМІНІЄВОЇ ГРАВІТАЦІЙНОЇ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ З РІЗЬБОВОЮ КАПІЛЯРНОЮ СТРУКТУРОЮ

*Наведено результати експериментального дослідження термічного опору алюмінієвої гравітаційної теплової труби (ТТ) з різьбовою капілярною структурою з ізобутаном як теплоносієм в умовах відводу теплоти вільною конвекцією повітря. Надано порівняння значень термічного опору даної ТТ і алюмінієвого термосифона тих самих розмірів, що має гладку поверхню корпусу в зоні випаровування. Показано, що в області значень теплового потоку, що підводиться, від 5 до 50 Вт термічний опір гравітаційної ТТ є суттєво нижчим, ніж термосифона. Дослідження проводилися як без використання радіаторів, так і зі встановленими одним, двома та трьома радіаторами в зоні конденсації теплопередавальних пристроїв.*

*Ключові слова: тепла труба, різьбова капілярна структура, ізобутан, термічний опір, електронна апаратура, світлодіодний світильник.*

DOI: 10.15222/TKEA2017.4-5.24  
UDC 536.248.2; 628.941.8

Yu. E. NIKOLAENKO, D. V. KOZAK

Ukraine, Kiev, National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute»  
E-mail: yunikola@ukr.net

## THERMAL RESISTANCE OF ALUMINUM GRAVITY HEAT PIPE WITH THREADED CAPILLARY STRUCTURE

*The results of an experimental study of the thermal resistance of an aluminum gravitational heat pipe with isobutane (R600a) as a working fluid under conditions of heat removal of natural air convection are presented. Comparison of the thermal resistance of an aluminum gravitational heat pipe with a threaded capillary structure and the thermal resistance of an aluminum thermosyphon of the same size, having a smooth surface of the body in the evaporation zone, is given. It is shown that in the range of values of the input heat flux*



from 5 to 50 W the thermal resistance of the gravitational heat pipe is substantially lower than the thermal resistance of the thermosiphon. The studies were conducted both without the use of additional radiators in the condensation zone of heat transfer devices, and with the use of one, two and three radiators.

**Keywords:** heat pipe, isobutane, threaded capillary structure, thermal resistance, electronic equipment, LED lighting device.

## REFERENCES

1. Wei J. Hybrid Cooling Technology for Large-Scale Computing Systems: From Back to the Future. *ASME 2011 Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Systems, MEMS and NEMS: Vol. 2* (Portland, Oregon, USA, 2011): pp. 107-111. <http://dx.doi.org/10.1115/IPACK2011-52045>
2. Dorozhkin Yu., Turkin A., Chervinsky M. [New families of LED modules CXA series from Cree]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*, 2014, no1, pp. 36-39 (Rus).
3. Ping H. Chen, Shyy W. Chang, Kuei F. Chiang, Ji Li. High Power Electronic Component: Review. *Recent Patents on Engineering*. 2008, vol. 2, iss. 3, pp. 174-188. <http://dx.doi.org/10.2174/187221208786306270>
4. Sukhvinder S. Kang. Advanced Cooling for Power Electronics. *International Conference on Integrated Power Electronics Systems CIPS 2012*, Nuremberg, Germany, pp. 1-8. <https://www.aavid.com/sites/default/files/news/Aavid-Liquid-Cooling-Advances-CIPS-2012.pdf>
5. Jing Wang, Xin-Jie Zhao, Yi-Xi Cai, Chun Zhang, Wei-Wei Bao. Experimental study on the thermal management of high-power LED headlight cooling device integrated with thermoelectric cooler package. *Energy Conversion and Management*. 2015, vol. 101, pp. 532-540. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.040>
6. Khairnasov S., Naumova A. Heat Pipes Application in Electronics Thermal Control Systems. *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*, 2015, vol. 6, iss. 6, pp. 1-14. <http://dx.doi.org/10.5098/fhp.6.6>
7. Masataka Mochizuki, Thang Nguyen, Koichi Mashiko, Yuji Saito, Tien Nguyen and Vijit Wuttijumnong. A Review of Heat Pipe Application Including new Opportunities. *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*. 2011, vol. 2, 013001, pp. 1-15. <http://dx.doi.org/10.5098/fhp.v2.1.3001>
8. A. Shanmuga Sundaram, Anirudh Bhaskaran. Thermal Modeling of Thermosiphon Integrated Heat Sink for CPU Cooling. *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, 2011, iss. 1, pp. 15-21. <http://dx.doi.org/10.4236/jectc.2011.12002>
9. Ivanovskiy M. N., Sorokyn V. P., Iagodkin I. V. [Physical fundamentals of heat pipes]. Moscow, Atomizdat, 1978, 256 p. (Rus)
10. Smirnov G. F., Burdo O. G. [Modeling of processes in heat pipes and thermosiphon], Odessa, Poligraf, 2012, 294 p. (Rus)
11. Vasiliev L L. Micro and miniature heat pipes-Electronic component cooler. *Appl Therm Eng.*, 2008, vol. 28, pp. 266-273. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.023>
12. Kravets V., Alekseik Ye., Alekseik O., Khairnasov S., Baturkin V., Ho T., Celotti L. Heat pipes with variable thermal conductance property for space applications. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, vol. 31, iss. 6, pp. 2613-2620. <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-017-0503-8>
13. Boris Rassamakin; Sergii Khairnasov; Anna Anisimova. Thermal Performance of Aluminium Grooved Heat Pipes. *2016 IEEE International Conference on Electronics and Information Technology (EIT'16). Conference Proceeding*. Ukraine, Odessa, 2016, pp. 1-4. <http://dx.doi.org/10.1109/ICEAIT.2016.7500979>
14. Nikolaenko Yu. E., Rotner S. M. Using Laser Radiation for the Formation of Capillary Structure in Flat Ceramic Heat Pipes. *Technical Physics Letters*. 2012, vol. 38, iss. 12, pp. 1056-1058. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063785012120085>
15. Vasilyev L. L., Vaaz S. L., Kiselev V. G., Konev S. V., Grakovich L. P. [Low-temperature heat pipes]. Minsk, Nauka i tehnika, 1976, 136 p. (Rus)
16. Ji Li, Wenkai Tian, Lucang Lv. A thermosiphon heat pipe cooler for high power LEDs cooling. *Heat Mass Transfer*. 2016, vol. 52, iss. 8, pp. 1541-1548. <http://dx.doi.org/10.1007/s00231-015-1679-z>
17. Pat. 109840 Ukraine. [Gravity heat pipe]. Yu. E. Nikolaenko. 2016, byul. no 17 (Ukr). <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19508>
18. Kozak D. V., Nikolaenko Yu. E. The Working Characteristics of Two-Phase Heat Transfer Devices for LED Modules. *2016 IEEE International Conference on Electronics and Information Technology (EIT'16). Conference Proceeding*. Ukraine, Odessa, 2016, pp. 1-4. <http://dx.doi.org/10.1109/ICEAIT.2016.7500980>
19. Kozak D. V., Nikolaenko Yu. E. Thermal resistance of a gravitational heat pipe with a thread-like capillary structure. *Problems of the scientific safety of power engineering: Material of the XIV International Scientific and Practical Conference of Aspirants, magistrants and students*, 85 priests of the heat and power faculty, Kyiv, NTUU "KPI", 2016, vol. 1, pp. 81. [http://tef.kpi.ua/rub\\_334.htm](http://tef.kpi.ua/rub_334.htm)
20. Pat. 81688 Ukraine. [LED lighting unit]. Yu. E. Nikolaenko, B. M., Rassamakin, S. M. Khairnasov. 2014, byul. no 13. (Ukr) <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=189034>
21. Nikolaenko T. Yu., Nikolaenko Yu. E. New circuit solutions for the thermal design of chandeliers with Light Emitting Diodes. *Light & Engineering*. 2015, vol. 23, no. 3, pp. 85-88. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=s2.0-84966507707&partnerID=MN8TOARS>

К. т. н. В. П. ЗАЙКОВ, д. т. н. В. И. МЕЩЕРЯКОВ<sup>1</sup>, к. т. н. Ю. И. ЖУРАВЛЁВ<sup>2</sup>

Украина, <sup>1</sup>Одесский государственный экологический университет,

<sup>2</sup>Национальный университет «Одесская морская академия»

E-mail: gradan@ua.fm

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ДВУХКАСКАДНЫХ ТЭУ С РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ВЕТВЕЙ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

*Проведен сравнительный анализ основных параметров и показателей надежности двухкаскадных ТЭУ при вариации геометрии ветвей термоэлементов в каскадах и перепадах температуры для характерных токовых режимов работы при условии одинаковой конфигурации ветвей в каскадах. Предложены критерии, позволяющие вести построение двухкаскадных ТЭУ повышенной надежности, выбирая токовый режим работы при заданной геометрии ветвей термоэлементов в каскадах с учетом весомости каждого из ограничительных факторов.*

**Ключевые слова:** термоэлектрическое охлаждающее устройство, термоэлемент, геометрия ветви, токовый режим работы, показатели надежности.

В настоящее время для обеспечения тепловых режимов (**ОТР**) элементов и составных частей радиоэлектронной аппаратуры широкое применение нашли термоэлектрические устройства (**ТЭУ**), обладающие такими достоинствами, как высокая надежность, отсутствие шума и вибраций, компактность, экологичность и др. [1–3]. Поскольку показатели надежности применяемых систем ОТР должны соответствовать предъявляемым к аппаратуре требованиям, оценивать их необходимо вместе с охлаждающими возможностями уже на этапе проектирования.

В термоэлектрическом приборостроении для конструирования одно- и многокаскадных ТЭУ используются термоэлектрические модули различных типоразмеров и электрической мощности. В этом случае перед разработчиком стоит проблема выбора рационального варианта геометрии ветвей термоэлементов и токового режима работы ТЭУ для оптимального решения поставленной задачи с учетом заданных ограничений (энергопотребление, величина рабочего тока и напряжения, количество термоэлементов, масса и габаритные размеры, уровень надежности и т. д.).

Целью настоящей работы является установление влияния конфигурации ветвей термоэлементов на основные параметры и показатели надежности двухкаскадных ТЭУ и проведение сравнительного анализа их характеристик в различных режимах работы.

Основные параметры и показатели надежности двухкаскадного ТЭУ были рассчитаны для четырех токовых режимов работы: максимальной холодопроизводительности ( $Q_{\text{omax}}$ ) и минимальной интенсивности отказов ( $\lambda_{\text{min}}$ ), а также промежуточных режимов ( $Q_0/I_{\text{max}}$  и  $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ ).

Расчеты проводились для различных значений отношения высоты ветви каскада  $l$  к площади ее поперечного сечения  $S$  при условии, что геометрия ветвей в каскадах одинакова, т. е.  $(l/S)_1 = (l/S)_2 = l/S$ , при следующих исходных данных:

- холодопроизводительность  $Q_0 = 2$  Вт;
- температура тепловыделяющего спая  $T = 300$  К;
- диапазон изменения общего перепада температуры  $\Delta T = 60–90$  К;
- диапазон изменения геометрии ветвей  $l/S = 2–20$  см<sup>–1</sup>;
- номинальная интенсивность отказов  $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$  1/ч;
- назначенный ресурс  $t = 10^4$  ч.

Вычисления проводились по соотношениям, приведенным в [4, 5], для следующих величин ( $i$  в обозначениях означает принадлежность параметра к соответствующему каскаду):

- $I$  — рабочий ток ТЭУ;
- $B_i$  — относительный рабочий ток;
- $I_{\text{max}i}$  — максимальный рабочий ток;
- $n_i$  — количество термоэлементов;
- $T_0$  — температура теплопоглощающего спая, К;
- $T_1$  — промежуточная температура;
- $\Theta_i$  — относительный перепад температуры;
- $W_\Sigma$  — мощность потребления ТЭУ;
- $E$  — холодильный коэффициент;
- $U_\Sigma$  — падение напряжения на ТЭУ;
- $\lambda$  — интенсивность отказов ТЭУ;
- $\lambda/\lambda_0$  — относительная величина интенсивности отказов ТЭУ;
- $P$  — вероятность безотказной работы ТЭУ.

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Результаты расчетов приведены в **табл. 1—4**.

Анализ расчетных данных показал, что для всех исследованных режимов работы двухкаскадных ТЭУ при заданной тепловой нагрузке  $Q_0$  с уменьшением отношения  $l/S$  для различных значений перепада температуры  $\Delta T$ :

- увеличивается рабочий ток  $I$ ;
- увеличивается максимальный рабочий ток  $I_{\max i}$  в каскадах;
- уменьшается общее падение напряжения  $U_{\Sigma}$ ;
- уменьшается суммарное количество термоэлементов  $n_1 + n_2$ ;
- уменьшается интенсивность отказов  $\lambda$ ;
- увеличивается вероятность безотказной работы  $P$ .

При этом следует отметить, что от геометрии ветвей термоэлементов не зависят такие величины, как промежуточная температура  $T_1$ , относительный рабочий ток каскада  $B_i$ , относительный перепад температуры в каскадах  $\Theta_i$ , суммарная

мощность потребления  $W_{\Sigma}$ , холодильный коэффициент  $E$ , отношение количества термоэлементов в каскадах  $n_1/n_2$ .

Для всех исследованных токовых режимов работы двухкаскадного ТЭУ при заданной тепловой нагрузке  $Q_0$  с ростом перепада температуры  $\Delta T$  для различных значений отношения  $l/S$ :

- уменьшается промежуточная температура  $T_1$  (**рис. 1**), которая не зависит от режима работы;
- относительный рабочий ток в каскадах увеличивается во всех рассмотренных режимах, кроме режима  $Q_{0\max}$ , где  $B_1$  остается постоянным, а  $B_2$  уменьшается (**рис. 2**);
- величина рабочего тока  $I$  увеличивается во всех рассмотренных режимах, кроме режима  $Q_{0\max}$ , где  $I$  уменьшается;
- максимальный рабочий ток в каскадах незначительно уменьшается;
- суммарное количество термоэлементов увеличивается (см. **рис. 3**, где представлены дан-

Таблица 1

Основные параметры и показатели надежности двухкаскадного ТЭУ, полученные для различных режимов работы при  $T = 300$  К;  $\Delta T = 60$  К;  $Q_0 = 2$  Вт;  $T_1 = 267$  К;  $\Theta_1 = 0,426$ ;  $\Theta_2 = 0,39$

$l/S$ , см <sup>-1</sup>	Режим работы	$B_1$	$B_2$	$I$ , А	$n_1$ , шт.	$n_2$ , шт.	$n_1/n_2$	$n_1+n_2$ , шт.	$W_{\Sigma}$ , Вт	$U_{\Sigma}$ , В	$E$	$\lambda/\lambda_0$	$P$
40	$Q_{0\max}$	1,0	0,97	1,20	68,2	249,0	0,27	317,2	41,4	34,8	0,048	292,0	0,9162
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,65	0,63	0,81	81,8	199,5	0,41	281,3	17,1	21,2	0,117	45,7	0,9864
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,43	0,41	0,50	160	339,2	0,47	500	13,4	26,7	0,150	13,3	0,9960
	$\lambda_{\min}$	0,33	0,32	0,39	320	730	0,44	1050	17,9	45,8	0,112	9,2	0,9972
20	$Q_{0\max}$	1,0	0,97	2,40	34,1	124,4	0,27	158,5	41,4	17,5	0,048	146	0,9572
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,65	0,63	1,61	40,8	100,0	0,41	140,8	17,1	10,6	0,117	22,8	0,9932
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,43	0,41	1,0	80,0	170	0,47	250	13,4	13,4	0,150	6,65	0,9980
	$\lambda_{\min}$	0,33	0,32	0,78	160,4	366,5	0,44	527	17,9	22,9	0,112	4,6	0,9986
10	$Q_{0\max}$	1,0	0,97	4,75	17,0	62,0	0,27	79,0	41,4	8,7	0,048	72,7	0,9784
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,65	0,63	3,20	20,4	50,0	0,41	70,4	17,1	5,3	0,117	11,4	0,9966
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,43	0,41	2,0	40,0	84,6	0,47	125	13,4	6,61	0,150	3,33	0,9990
	$\lambda_{\min}$	0,33	0,32	1,56	80,0	181	0,44	261	17,9	11,4	0,112	2,3	0,99931
4,5	$Q_{0\max}$	1,0	0,97	10,6	7,6	27,9	0,27	35,5	41,4	3,9	0,048	32,8	0,9902
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,65	0,63	7,2	9,2	22,5	0,41	31,7	17,1	2,4	0,117	5,1	0,0085
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,43	0,41	4,5	17,9	38,0	0,47	55,9	13,4	3,0	0,150	1,5	0,99955
	$\lambda_{\min}$	0,33	0,32	3,5	35,9	81,6	0,44	117,6	17,9	5,2	0,112	1,0	0,99969
2,0	$Q_{0\max}$	1,0	0,97	23,7	3,4	12,4	0,27	15,8	41,4	1,74	0,048	14,0	0,9958
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,65	0,63	16,1	4,0	9,8	0,41	13,8	17,1	1,06	0,117	2,3	0,99932
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,43	0,41	10,1	8,0	17,0	0,47	25,0	13,4	1,32	0,150	0,67	0,99980
	$\lambda_{\min}$	0,33	0,32	7,8	16,0	36,5	0,44	52,5	17,9	2,30	0,112	0,56	0,99986

Таблица 2

Основные параметры и показатели надежности двухкаскадного ТЭУ, полученные для различных режимов работы при  $T = 300 \text{ K}$ ;  $\Delta T = 70 \text{ K}$ ;  $Q_0 = 2 \text{ Вт}$ ;  $T_1 = 262 \text{ K}$ ;  $\Theta_1 = 0,56$ ;  $\Theta_2 = 0,47$

$l/S, \text{ см}^{-1}$	Режим работы	$B_1$	$B_2$	$I, \text{ А}$	$n_1, \text{ шт.}$	$n_2, \text{ шт.}$	$n_1/n_2$	$n_1+n_2, \text{ шт.}$	$W_{\Sigma}, \text{ Вт}$	$U_{\Sigma}, \text{ В}$	$E$	$\lambda/\lambda_0$	$P$
40	$Q_{\text{оmax}}$	1,0	0,96	1,17	96,6	376,8	0,256	473,4	60,0	51,3	0,033	427,8	0,8796
	$(Q_0/I)_{\text{max}}$	0,65	0,63	0,90	110,4	314,6	0,351	425	31,5	35,0	0,0635	116,0	0,9656
	$(Q_0/I^2)_{\text{max}}$	0,56	0,54	0,65	172,6	424,6	0,40	587,2	25,8	39,7	0,0775	52,9	0,99842
	$\lambda_{\text{min}}$	0,46	0,44	0,53	300,4	733	0,41	1033	30,7	57,9	0,0652	37,4	0,9886
20	$Q_{\text{оmax}}$	1,0	0,96	2,33	48,3	188,4	0,256	236,7	60,0	25,7	0,033	213,9	0,9379
	$(Q_0/I)_{\text{max}}$	0,65	0,63	1,80	55,2	157,3	0,351	212,5	31,5	17,6	0,0635	58,2	0,9828
	$(Q_0/I^2)_{\text{max}}$	0,56	0,54	1,31	86,3	212,6	0,40	299,0	25,8	19,7	0,0775	26,47	0,9921
	$\lambda_{\text{min}}$	0,46	0,44	1,06	150,2	366	0,41	516,3	30,7	28,9	0,0652	18,7	0,9944
10	$Q_{\text{оmax}}$	1,0	0,96	4,65	24,3	94,7	0,256	119,0	60,0	12,9	0,033	107,7	0,9682
	$(Q_0/I)_{\text{max}}$	0,65	0,63	3,60	27,6	78,7	0,351	106,3	31,5	8,76	0,0635	29,1	0,9914
	$(Q_0/I^2)_{\text{max}}$	0,56	0,54	2,61	43,2	106,4	0,40	149,6	25,8	9,90	0,0775	13,25	0,9960
	$\lambda_{\text{min}}$	0,46	0,44	2,12	75,4	183	0,41	258,5	30,7	14,5	0,0652	9,4	0,9972
4,5	$Q_{\text{оmax}}$	1,0	0,96	10,35	10,9	42,5	0,256	53,4	60,0	5,8	0,033	48,4	0,9856
	$(Q_0/I)_{\text{max}}$	0,65	0,63	8,0	12,4	35,3	0,351	47,7	31,5	3,94	0,0635	13,1	0,9963
	$(Q_0/I^2)_{\text{max}}$	0,56	0,54	5,81	19,4	47,7	0,40	67,1	25,8	4,45	0,0775	5,94	0,9982
	$\lambda_{\text{min}}$	0,46	0,44	4,71	33,9	82,0	0,41	115,9	30,7	6,5	0,0652	4,23	0,9987
2,0	$Q_{\text{оmax}}$	1,0	0,96	23,3	4,8	18,8	0,256	23,6	60,0	2,56	0,033	21,5	0,9936
	$(Q_0/I)_{\text{max}}$	0,65	0,63	18,0	5,6	16,0	0,351	21,6	31,5	1,76	0,0635	5,9	0,9982
	$(Q_0/I^2)_{\text{max}}$	0,56	0,54	13,1	8,6	21,2	0,40	29,8	25,8	1,97	0,0775	2,64	0,99921
	$\lambda_{\text{min}}$	0,46	0,44	10,6	15,0	36,6	0,41	51,6	30,7	2,9	0,0652	1,87	0,99944

ные для режима  $Q_{\text{оmax}}$ , для остальных режимов характер зависимостей аналогичный);

— увеличивается относительный перепад температуры в каскадах (**рис. 4**);

— уменьшается холодильный коэффициент (**рис. 5**);

— уменьшается отношение количества термоэлементов в каскадах  $n_1/n_2$  (**рис. 6**).

Приведенные расчетные данные указывают на то, что на параметры ТЭУ достаточно сильно влияет как геометрия ветвей термоэлементов, так и режим работы. Таким образом, очевидно, что разработчикам каскадных ТЭУ приходится решать многокритериальную задачу, поскольку обычно при их проектировании стремятся к:

- снижению рабочего тока  $I$ ;
- повышению падения напряжения  $U$ ;
- увеличению холодильного коэффициента  $E$ ;
- уменьшению суммарного количества термоэлементов  $n_1+n_2$ ;

— уменьшению интенсивности отказов  $\lambda$ , а следовательно к увеличению вероятности безотказной работы  $P$ .

При рациональном построении ТЭУ геометрию термоэлементов и токовый режим следует выбирать с учетом весомости каждого из перечисленных параметров, и для возможности проведения сравнительного анализа предлагается использовать следующие критерии:

$$K_I = \frac{I_{\lambda_{\text{min}}}}{I_j}; \quad K_U = \frac{U_j}{U_{\lambda_{\text{min}}}};$$

$$K_n = \frac{(n_1 + n_2)_j}{(n_1 + n_2)_{\lambda_{\text{min}}}}; \quad K_{\lambda} = \frac{(\lambda / \lambda_0)_{\lambda_{\text{min}}}}{(\lambda / \lambda_0)_j},$$

где индекс  $\lambda_{\text{min}}$  означает, что рассматриваемый параметр был получен в режиме минимальной интенсивности отказов, а индекс  $j$  — в любом другом режиме.

Эти критерии представляют собой относительные величины, составленные с учетом того, что в режиме  $\lambda_{\text{min}}$  обеспечиваются наибольшие по сравнению с другими режимами значения падения напряжения и суммарного количества термоэлементов и наименьшие значения рабочего



# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Таблица 3

Основные параметры и показатели надежности двухкаскадного ТЭУ, полученные для различных режимов работы при  $T = 300 \text{ K}$ ;  $\Delta T = 80 \text{ K}$ ;  $Q_0 = 2 \text{ Вт}$ ;  $T_1 = 256 \text{ K}$ ;  $\Theta_1 = 0,716$ ;  $\Theta_2 = 0,57$

$l/S, \text{ см}^{-1}$	Режим работы	$B_1$	$B_2$	$I, \text{ А}$	$n_1, \text{ шт.}$	$n_2, \text{ шт.}$	$n_1/n_2$	$n_1+n_2, \text{ шт.}$	$W_{\Sigma}, \text{ Вт}$	$U_{\Sigma}, \text{ В}$	$E$	$\lambda/\lambda_0$	$P$
40	$Q_{\text{оmax}}$	1,0	0,94	1,12	169,2	734	0,23	903,2	107,5	96,0	0,0186	776	0,7923
	$(Q_0/I)_{\text{max}}$	0,83	0,78	0,98	165,4	612	0,27	777,4	68,4	70,1	0,0292	322,4	0,9078
	$(Q_0/I^2)_{\text{max}}$	0,72	0,67	0,80	234,4	752,4	0,31	986,6	63,2	79,0	0,0316	229,4	0,9335
	$\lambda_{\text{min}}$	0,63	0,59	0,71	325	1008	0,32	1333	67,4	95,0	0,0297	183	0,9466
20	$Q_{\text{оmax}}$	1,0	0,94	2,24	84,6	376,0	0,23	451,4	107,5	48,0	0,0186	388	0,8900
	$(Q_0/I)_{\text{max}}$	0,83	0,78	1,95	82,6	305,6	0,27	388,1	68,4	35,1	0,0292	161,4	0,9528
	$(Q_0/I^2)_{\text{max}}$	0,72	0,67	1,61	117,2	376,2	0,31	493,4	63,2	39,3	0,0316	114,7	0,9662
	$\lambda_{\text{min}}$	0,63	0,59	1,41	162,5	502,2	0,32	664,7	67,4	47,8	0,0297	91,5	0,9729
10	$Q_{\text{оmax}}$	1,0	0,94	4,49	41,9	182,0	0,23	223,9	107,5	23,9	0,0186	193	0,9438
	$(Q_0/I)_{\text{max}}$	0,83	0,78	3,90	41,4	153,2	0,27	194,6	68,4	17,6	0,0292	81,0	0,9760
	$(Q_0/I^2)_{\text{max}}$	0,72	0,67	3,21	58,6	188,1	0,31	246,7	63,2	19,7	0,0316	57,4	0,9829
	$\lambda_{\text{min}}$	0,63	0,59	2,83	81,0	250,1	0,32	331,1	67,4	23,8	0,0297	45,6	0,9864
4,5	$Q_{\text{оmax}}$	1,0	0,94	9,97	18,9	81,9	0,23	100,8	107,5	10,8	0,0186	86,8	0,9743
	$(Q_0/I)_{\text{max}}$	0,83	0,78	8,67	18,6	68,4	0,27	87,0	68,4	7,89	0,0292	36,4	0,9891
	$(Q_0/I^2)_{\text{max}}$	0,72	0,67	7,14	26,4	84,7	0,31	111,0	63,2	8,9	0,0316	25,8	0,9923
	$\lambda_{\text{min}}$	0,63	0,59	6,28	40,5	125,5	0,32	166,0	67,4	10,7	0,0297	22,8	0,9932
2,0	$Q_{\text{оmax}}$	1,0	0,94	22,4	8,4	36,5	0,23	44,9	107,5	4,8	0,0186	39,7	0,9882
	$(Q_0/I)_{\text{max}}$	0,83	0,78	19,5	8,2	30,3	0,27	38,5	68,4	3,5	0,0292	16,2	0,9952
	$(Q_0/I^2)_{\text{max}}$	0,72	0,67	16,0	9,1	29,3	0,31	38,4	63,2	3,96	0,0316	9,8	0,9971
	$\lambda_{\text{min}}$	0,63	0,59	14,1	16,2	50,3	0,32	66,5	67,4	4,8	0,0297	9,0	0,9973

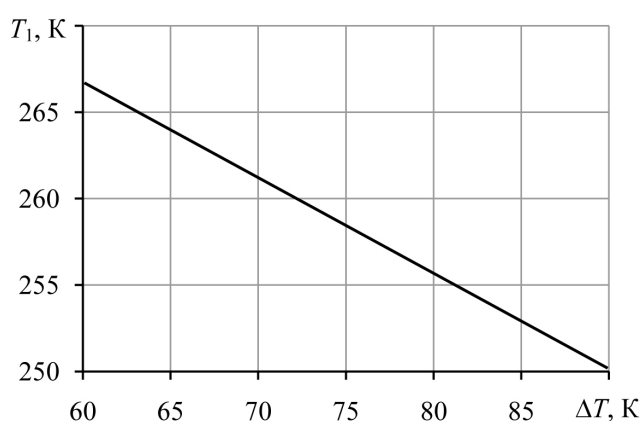


Рис. 1. Зависимость промежуточной температуры  $T_1$  двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 \text{ K}$ ;  $Q_0 = 2 \text{ Вт}$

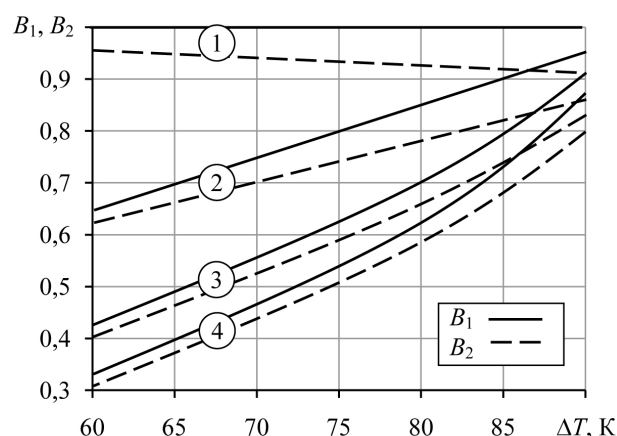


Рис. 2. Зависимость относительного рабочего тока первого ( $B_1$ ) и второго ( $B_2$ ) каскадов двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 \text{ K}$ ;  $Q_0 = 2 \text{ Вт}$  для различных режимов работы: 1 –  $Q_{0\text{max}}$ ; 2 –  $(Q_0/I)_{\text{max}}$ ; 3 –  $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ ; 4 –  $\lambda_{\text{min}}$

Таблица 4

Основные параметры и показатели надежности двухкаскадного ТЭУ, полученные для различных режимов работы при  $T = 300 \text{ K}$ ;  $T = 90 \text{ K}$ ;  $Q_0 = 2 \text{ Вт}$ ;  $T_1 = 250 \text{ K}$ ;  $\Theta_1 = 0,91$ ;  $\Theta_2 = 0,68$

$l/S, \text{ см}^{-1}$	Режим работы	$B_1$	$B_2$	$I, \text{ А}$	$n_1, \text{ шт.}$	$n_2, \text{ шт.}$	$n_1/n_2$	$n_1+n_2, \text{ шт.}$	$W_{\Sigma}, \text{ Вт}$	$U_{\Sigma}, \text{ В}$	$E$	$\lambda/\lambda_0$	$P$
40	$Q_{\text{оmax}}$	1,0	0,91	1,1	582	3054	0,19	3636	402,0	373,6	0,0050	2862	0,4238
	$(Q_0/I)_{\text{max}}$	0,95	0,87	1,07	572	2860	0,20	3432	359,0	335,6	0,00557	2236	0,5113
	$(Q_0/I^2)_{\text{max}}$	0,91	0,83	0,98	643,8	3019	0,21	3663	338,6	347,3	0,00591	2000	0,5488
	$\lambda_{\text{min}}$	0,87	0,80	0,94	701,4	3226	0,22	3928	339,0	361,0	0,0059	1849	0,5742
20	$Q_{\text{оmax}}$	1,0	0,91	2,15	291	1527	0,19	1818	402,0	186,8	0,0050	1431	0,6510
	$(Q_0/I)_{\text{max}}$	0,95	0,87	2,13	286	1430	0,20	1716	359,0	168,5	0,00557	1118	0,7150
	$(Q_0/I^2)_{\text{max}}$	0,91	0,83	1,95	321,9	1510	0,21	1832	338,6	173,6	0,00591	988,9	0,7410
	$\lambda_{\text{min}}$	0,87	0,80	1,88	350,7	1613	0,22	1964	339,0	180,3	0,0059	924,6	0,7578
10	$Q_{\text{оmax}}$	1,0	0,91	4,31	145,0	763	0,19	908,7	402,0	93,4	0,0050	715	0,8069
	$(Q_0/I)_{\text{max}}$	0,95	0,87	4,26	143,0	715	0,20	858	359,0	84,3	0,00557	558	0,8459
	$(Q_0/I^2)_{\text{max}}$	0,91	0,83	3,90	160,6	753,7	0,21	914,3	338,6	86,8	0,00591	500	0,8607
	$\lambda_{\text{min}}$	0,87	0,80	3,76	175,4	808	0,22	983,0	339,0	90,1	0,0059	463	0,8704
4,5	$Q_{\text{оmax}}$	1,0	0,91	9,57	65,2	342	0,19	407,0	402,0	42,0	0,0050	320,9	0,9082
	$(Q_0/I)_{\text{max}}$	0,95	0,87	9,47	64,4	322	0,20	386,4	359,0	37,9	0,00557	251,4	0,9274
	$(Q_0/I^2)_{\text{max}}$	0,91	0,83	8,86	72,2	338,7	0,21	410,9	338,6	39,0	0,00591	224,7	0,9348
	$\lambda_{\text{min}}$	0,87	0,80	8,40	78,9	363	0,22	441,8	339,0	40,6	0,0059	208,0	0,9395
2,0	$Q_{\text{оmax}}$	1,0	0,91	21,5	29,1	152,7	0,19	181,8	402,0	18,7	0,0050	144	0,9577
	$(Q_0/I)_{\text{max}}$	0,95	0,87	21,3	38,6	143,0	0,20	171,6	359,0	16,9	0,00557	112	0,9670
	$(Q_0/I^2)_{\text{max}}$	0,91	0,83	19,5	32,0	150,0	0,21	182,0	338,6	17,4	0,00591	97,6	0,9711
	$\lambda_{\text{min}}$	0,87	0,80	18,8	35,1	161,5	0,22	196,6	339,0	18,0	0,0059	92,6	0,9725

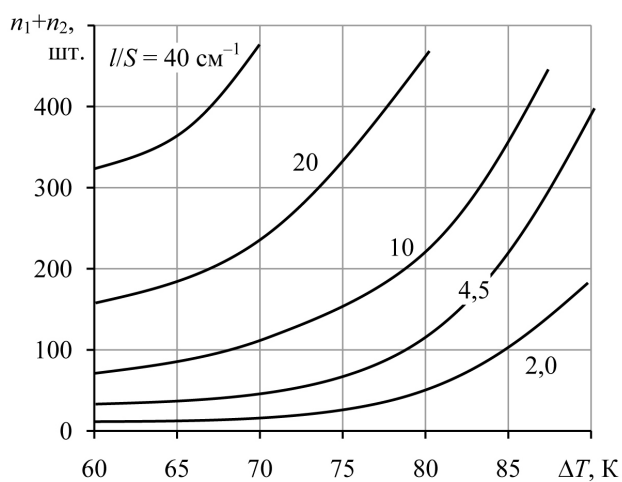


Рис. 3. Зависимость суммарного количества термоэлементов двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры  $\Delta T$  для различных значений отношения  $l/S$  при  $T = 300 \text{ K}$ ;  $Q_0 = 2 \text{ Вт}$  в режиме  $Q_{\text{оmax}}$

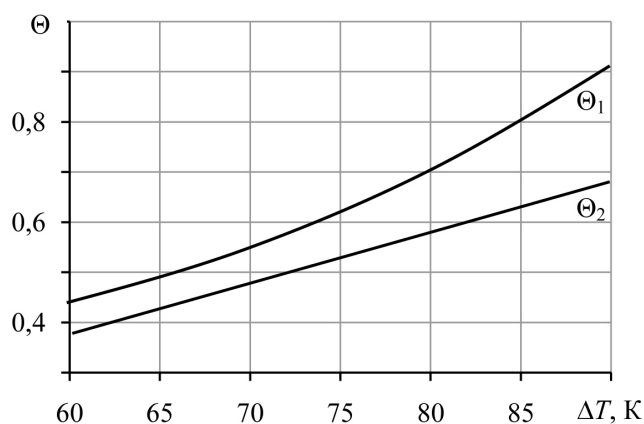


Рис. 4. Зависимость относительного перепада температуры в каскадах двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 \text{ K}$ ;  $Q_0 = 2 \text{ Вт}$

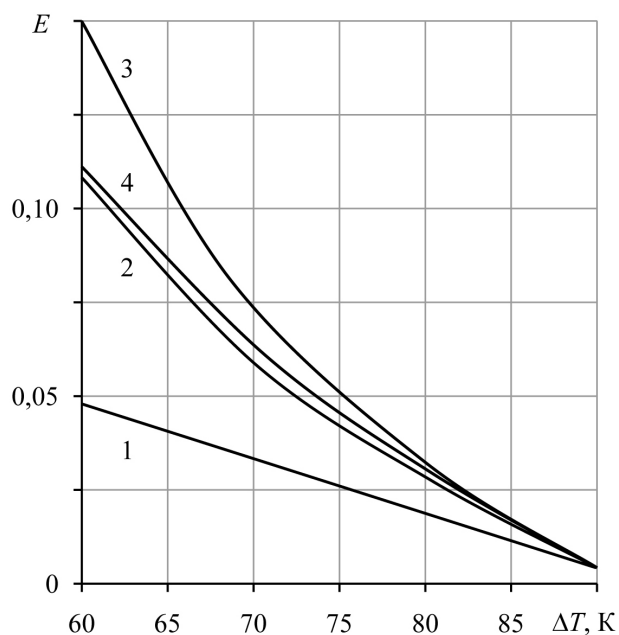


Рис. 5. Зависимость холодильного коэффициента  $E$  двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры  $\Delta T$  для различных режимов работы и конфигурации ветвей термоэлементов при  $T = 300$  К;  $Q_0 = 2$  Вт: 1 —  $Q_{0\max}$ ; 2 —  $(Q_0/I)_{\max}$ ; 3 —  $(Q_0/I^2)_{\max}$ ; 4 —  $\lambda_{\min}$

тока и интенсивности отказов. Удобство оперирования такими критериями обусловлено тем, что они не зависят от геометрии ветвей термоэлементов и позволяют оценить изменения весовых параметров при переходе от режима  $\lambda_{\min}$  к какому-либо другому.

Из представленных на рис. 7—10 зависимостей можно увидеть, насколько при фиксирован-

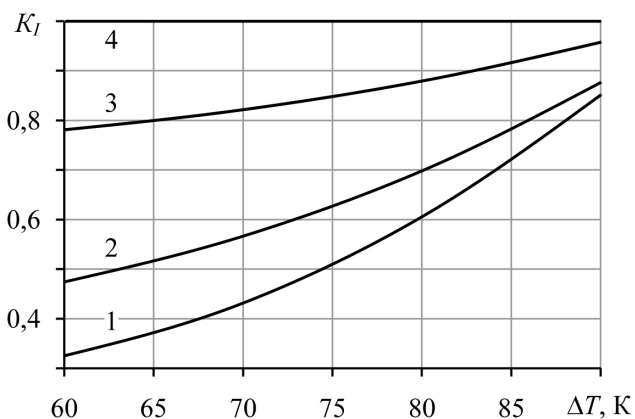


Рис. 7. Зависимость критерия  $K_I$  от общего перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300$  К;  $Q_0 = 2$  Вт:

$$1 - K_I = \frac{I_{\lambda_{\min}}}{I_{Q_{0\max}}}; 2 - K_I = \frac{I_{\lambda_{\min}}}{I_{(Q_0/I)_{\max}}};$$

$$3 - K_I = \frac{I_{\lambda_{\min}}}{I_{(Q_0/I^2)_{\max}}}; 4 - K_I = \frac{I_{\lambda_{\min}}}{I_{\lambda_{\min}}}$$

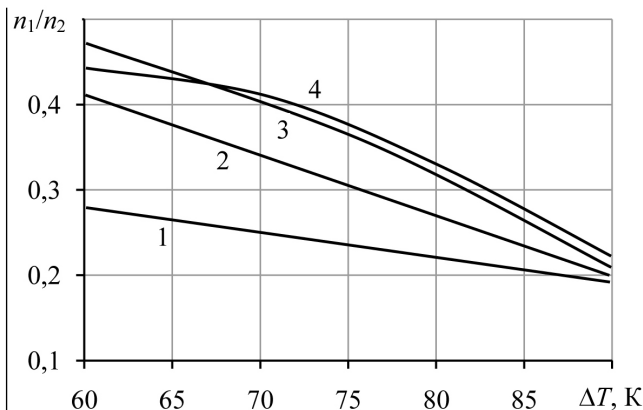


Рис. 6. Зависимость отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $n_1/n_2$  двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры  $\Delta T$  для различных режимов работы и геометрии ветвей термоэлементов при  $T = 300$  К;  $Q_0 = 2$  Вт:

1 —  $Q_{0\max}$ ; 2 —  $(Q_0/I)_{\max}$ ; 3 —  $(Q_0/I^2)_{\max}$ ; 4 —  $\lambda_{\min}$

ном перепаде температуры  $\Delta T$  и прочих равных условиях значения  $I$ ,  $n_1+n_2$ ,  $U$ ,  $\lambda/\lambda_0$  в выбранном режиме отличаются от этих значений в режиме  $\lambda_{\min}$ . Например, при  $\Delta T = 70$  К по сравнению с режимом  $\lambda_{\min}$ :

— рабочий ток в режиме  $Q_{0\max}$  увеличивается в 2,2 раза, в режиме  $(Q_0/I)_{\max}$  — в 1,7 раз, в режиме  $(Q_0/I^2)_{\max}$  — в 1,23 раза (рис. 7);

— суммарное количество термоэлементов в режиме  $Q_{0\max}$  увеличивается в 2,2 раза, в режиме  $(Q_0/I)_{\max}$  — в 2,4 раза, в режиме  $(Q_0/I^2)_{\max}$  — в 1,7 раз (рис. 8);

— падение напряжения на ТЭУ в режиме  $Q_{0\max}$  уменьшается в 1,2 раза, в режиме  $(Q_0/I)_{\max}$  — в 2,9 раз, в режиме  $(Q_0/I^2)_{\max}$  — в 1,9 раз (рис. 9);

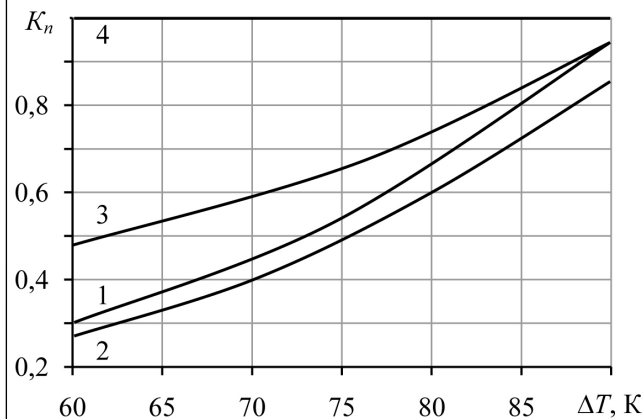


Рис. 8. Зависимость критерия  $K_n$  от общего перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300$  К;  $Q_0 = 2$  Вт:

$$1 - K_n = \frac{(n_1 + n_2)_{Q_{0\max}}}{(n_1 + n_2)_{\lambda_{\min}}}; 2 - K_n = \frac{(n_1 + n_2)_{(Q_0/I)_{\max}}}{(n_1 + n_2)_{\lambda_{\min}}};$$

$$3 - K_n = \frac{(n_1 + n_2)_{(Q_0/I^2)_{\max}}}{(n_1 + n_2)_{\lambda_{\min}}}; 4 - K_n = \frac{(n_1 + n_2)_{\lambda_{\min}}}{(n_1 + n_2)_{\lambda_{\min}}}$$

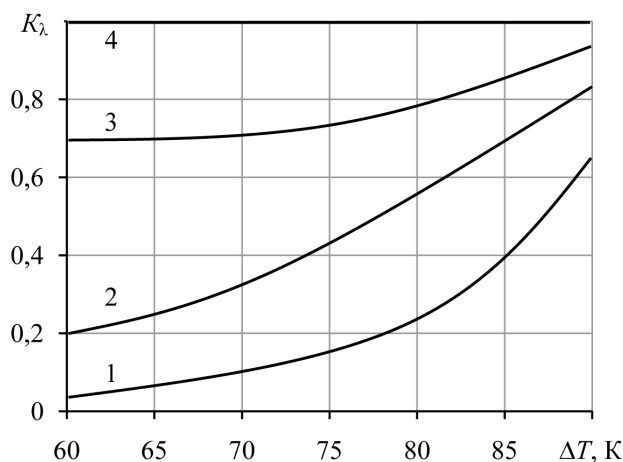


Рис. 9. Зависимость критерия  $K_U$  от общего перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300$  К;  $Q_0 = 2$  Вт:

$$1 - K_U = \frac{U_{Q_{0\max}}}{U_{\lambda_{\min}}}; 2 - K_U = \frac{U_{(Q_0/I)_{\max}}}{U_{\lambda_{\min}}};$$

$$3 - K_U = \frac{U_{(Q_0/I^2)_{\max}}}{U_{\lambda_{\min}}}; 4 - K_U = \frac{U_{\lambda_{\min}}}{U_{\lambda_{\min}}}$$

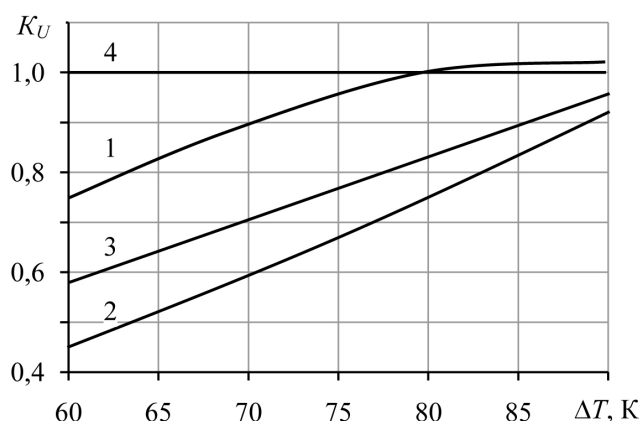


Рис. 10. Зависимость критерия  $K_\Sigma$  от общего перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300$  К;  $Q_0 = 2$  Вт:

$$1 - K_\lambda = \frac{(\lambda/\lambda_0)_{\lambda_{\min}}}{(\lambda/\lambda_0)_{Q_{0\max}}}; 2 - K_\lambda = \frac{(\lambda/\lambda_0)_{\lambda_{\min}}}{(\lambda/\lambda_0)_{(Q_0/I)_{\max}}};$$

$$3 - K_\lambda = \frac{(\lambda/\lambda_0)_{\lambda_{\min}}}{(\lambda/\lambda_0)_{(Q_0/I^2)_{\max}}}; 4 - K_\lambda = \frac{(\lambda/\lambda_0)_{\lambda_{\min}}}{(\lambda/\lambda_0)_{\lambda_{\min}}}$$

— интенсивность отказов в режиме  $Q_{0\max}$  увеличивается в 11 раз, в режиме  $(Q_0/I)_{\max}$  — в 3,1 раза, в режиме  $(Q_0/I^2)_{\max}$  — в 1,7 раза (рис. 10).

\* \* \*

Таким образом, проведенный анализ показал зависимость основных параметров и показателей надежности двухкаскадного ТЭУ и от геометрии ветвей термоэлементов, и от токового режима работы. Предложенные критерии оценки весомых характеристик ТЭУ помогут разработчикам проводить рациональное построение термоэлектрических охлаждающих двухкаскадных устройств, обеспечивающих высокую надежность при приемлемом энергопотреблении и малых габаритных размерах.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Diana Enescu, Elena Otilia Virjoghe. A review on thermoelectric cooling parameters and performance // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2014. — Vol. 38. — P. 903–916. — <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.045>

2. Zheng X.F., Liu C.X., Yan Y.Y., Wang Q. A review of thermoelectrics research – Recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2014. — Vol. 32. — P. 486–503. — <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.053>

3. S.B Riffat, Xiaoli Ma. Thermoelectrics: a review of present and potential applications // Applied Thermal Engineering. — 2003. — Vol. 23, iss. 8. — P. 913–935. — [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00012-7)

4. Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства. — Одесса: Политехперіодика, 2009.

5. Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлев Ю. И. Влияние эффективности исходных материалов на показатели надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Часть 2: Двухкаскадные ТЭУ // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2015. — № 2–3. — С. 34–38. — <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2015-2-3.34>

Дата поступления рукописи  
в редакцию 15.07 2017 г.

В. П. ЗАЙКОВ, В. И. МЕЩЕРЯКОВ<sup>1</sup>, Ю. И. ЖУРАВЛЬОВ<sup>2</sup>

Україна, <sup>1</sup>Одеський державний екологічний університет,  
<sup>2</sup>Національний університет «Одеська морська академія»

E-mail: gradan@ua.fm

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ І ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ДВОКАСКАДНИХ ТЕУ З РІЗНОЮ ГЕОМЕТРІЄЮ ГІЛОК ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ В РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Проведено порівняльний аналіз основних параметрів і показників надійності двокаскадних ТЕУ при варіації геометрії гілок термоелементів в каскадах і перепадів температури для характерних струмо-

вих режимів роботи за умови однакової конфігурації гілок в каскадах. Запропоновано критерії, що дозволяють вести побудову двокаскадних ТЕУ підвищеної надійності, вибираючи струмовий режим роботи при заданій геометрії гілок термоелементів в каскадах з урахуванням вагомості кожного з обмежувальних чинників.

**Ключові слова:** термоелектричний охолоджувальний пристрій, термоелемент, геометрія гілки, струмовий режим роботи, показники надійності.

DOI: 10.15222/TKEA2017.4-5.32  
UDC 621.362–192

V. P. ZAIKOV, V. I. MESHCHERYAKOV<sup>1</sup>,  
Yu. I. ZHURAVLYOV<sup>2</sup>

Ukraine, <sup>1</sup>Odessa State Environmental University,  
<sup>2</sup>National University «Odessa Maritime Academy»  
E-mail: gradan@ua.fm

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE MAIN RELIABILITY INDICES AND PARAMETERS OF TWO-STAGE THERMOELECTRIC DEVICES WITH DIFFERENT GEOMETRY OF THE BRANCHES OF THERMOELEMENTS IN VARIOUS OPERATING MODES

*The paper presents a comparative analysis of the main parameters and reliability indices of two-stage thermoelectric devices with a variation in the geometry of the branches of thermoelements in cascades and temperature drops for characteristic current operating modes under the condition of identical configuration of branches in cascades. The authors propose criteria that allow building two-stage high-reliability thermoelectric devices choosing the current operation mode for a given geometry of the branches of thermoelements in cascades, considering the significance of each of the limiting factors.*

**Key words:** thermoelectric cooling device, thermoelement, branch geometry, current operation mode, reliability indicators.

### REFERENCES

1. Diana Enescu, Elena Otilia Virjoghe. A review on thermoelectric cooling parameters and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 38, pp. 903–916. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.045>
2. Zheng X.F., Liu C.X., Yan Y.Y., Wang Q. A review of thermoelectrics research – Recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 32, pp. 486–503. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.053>
3. S.B Riffat, Xiaoli Ma. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, 2003, vol. 23, iss. 8, pp. 913–935. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00012-7)
4. Zaikov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F. *Prognostirovanie pokazatelei nadezhnosti termoelektricheskikh okhlazhdayushchikh ustroystv. Kniga 1. Odnokaskadnye ustroystva* [Predicting reliability indicators of thermoelectric cooling devices. Book 1. Single-stage devices], Odessa, Politekhpriodika, 2009. (Rus)
5. Zaikov V. P., Meshcheryakov V. I., Zhuravlev Yu. I. [Influence of the effectiveness of raw materials on the reliability of thermoelectric cooling devices. Part 2: Two-stage thermoelectric devices]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2015, no 2–3, pp. 34–38. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.2-3.34> (Rus)

ГОТОВИТСЯ К ПЕЧАТИ

НОВЫЕ КНИГИ



**Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлёв Ю. И. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 3. Методы повышения надежности термоэлектрических охлаждающих устройств.— Одесса: Политех-периодика, 2017.**



В. В. ГЛАДКОВСКИЙ, к. ф.-м. н. О. А. ФЕДОРОВИЧ

Украина, г. Киев, Институт ядерных исследований НАН Украины

E-mail: vvglad@yahoo.com

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИСЛОРОДА НА СКОРОСТЬ И АНИЗОТРОПИЮ ГЛУБИННОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ С УПРАВЛЯЕМЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

*Представлены результаты исследования влияния количества кислорода в смеси с гексафторидом серы на скорость и анизотропию травления кремния в плазмохимическом реакторе с управляемым магнитным полем. Процесс травления проходил при давлении в рабочей камере  $(0,3-2,0) \cdot 10^{-3}$  Торр, энергия химически активных ионов составляла 50–80 эВ. Исследовано влияние магнитного поля на скорость и анизотропию травления. Показано, что увеличение напряженности магнитного поля приводит к ухудшению анизотропии. Разработан и оптимизирован процесс глубокого плазмохимического травления кремния в плазмохимическом реакторе с управляемым магнитным полем в смеси  $SF_6-O_2$ , что позволило протравить кремний на глубину 100 мкм с анизотропией 10 при использовании защитной никелевой маски толщиной 0,4–1,0 мкм.*

*Ключевые слова:* глубинное травление кремния, анизотропия, энергия ионов, плазмохимия, магнитное поле.

Важнейшими технологическими задачами микроэлектроники являются процессы анизотропного плазмохимического травления, получение возможности управления профилем поверхности боковых стенок, а также глубокое травление различных материалов.

В [1] было установлено, что при травлении кремния в смеси  $CF_4-O_2$ , содержащей более 25%  $O_2$ , на его поверхности образуется хемосорбированный слой кислорода, который замедляет процесс травления. При увеличении содержания кислорода наблюдается гистерезисная зависимость скорости травления при заданной концентрации фтора. Кинетика химических реакций в плазме  $SF_6-O_2$  в целом такая же, как и в  $CF_4-O_2$ . Основным отличием является более высокая скорость генерации химически активных частиц в разряде  $SF_6$ , поскольку энергия разрыва связи  $S-F$  в молекуле  $SF_6$  меньше, чем связи  $C-F$  в молекуле  $CF_4$  (соответственно, 85 и 129 ккал/моль [2]). Вследствие этого скорость травления кремния в плазме  $SF_6-O_2$  в 5–10 раз выше, чем в плазме  $CF_4-O_2$  [3, 4]. Кроме этого, при использовании для травления кремния смеси  $SF_6-O_2$ , в отличие от  $CF_4-O_2$ , в продуктах выхлопа отсутствуют фторфосген ( $COF_2$ ) и другие токсические фторсодержащие соединения [3].

Полученный в [3, 4] результат показывает перспективность использования гексафторида серы (элегаза) для травления кремния. В плаз-

ме  $SF_6-O_2$  образуется значительное количество радикалов фтора, которые обеспечивают химическое травление кремния путем образования летучих соединений  $Si$  с  $F$  [4, 5]. Одновременно образуется атомарный кислород, обеспечивающий пассивацию поверхности кремния с образованием диоксида кремния и оксифторидов ( $SiO_xF_y$ ), которые используются в качестве маски для уменьшения скорости травления кремния [6]. Следует отметить, что при использовании для травления кремния плазмы смеси  $SF_6-O_2$  [4] также наблюдается гистерезисная зависимость скорости травления от содержания кислорода.

Исследование влияния количества кислорода и геометрии реактора на скорость травления кремния, концентрацию атомарного фтора и анизотропию процесса приведены в [7]. Зависимости скорости травления кремния от количества кислорода для реакторов различной геометрии одинаковы и имеют максимум при 20%-ном содержании  $O_2$ . При таком количестве кислорода в рабочей смеси в [7] были получены профили травления кремния с максимальной анизотропией при использовании высокочастотных (**ВЧ**) разрядов без магнитного поля и показано, что на плотность атомов фтора и, следовательно, на анизотропию профиля и скорость травления существенно влияет геометрия плазмохимического реактора.

Большинство приведенных в литературе результатов получены на установках для плазмохи-

мического травления без магнитного поля. При этом в [8] показано, что магнитное поле положительно влияет на скорость травления материала, с увеличением его напряженности наблюдается рост скорости травления. Очевидно, что исследования механизмов анизотропного травления и взаимодействия плазмы с обрабатываемой поверхностью в плазмохимических реакторах с магнитными полями представляют практический интерес.

Целью настоящей работы является исследование влияния количества кислорода в смеси с рабочим газом (гексафторидом серы) на процесс травления кремния в плазмохимическом реакторе с управляемым магнитным полем и поиск его оптимальных режимов.

### Методика и условия проведения экспериментов

Глубинное травление проводилось на установке с замкнутым дрейфом электронов, описание которой приведено в [9, 10]. В процессе травления ток разряда составлял 8 А, давление в рабочей камере  $P = (0,3 - 2,0) \cdot 10^{-3}$  Торр. С целью обеспечения целостности никелевой маски толщиной 0,4–1,0 мкм, используемой при травлении кремния на глубину порядка 100 мкм, величина энергии химически активных ионов выбиралась невысокой — на уровне 50–80 эВ. В [11] описаны результаты, полученные при плазмохимическом травлении кремния в среде элегаза с большой скоростью. Для увеличения анизотропии процесса и уменьшения скорости обработки образцов с суб- и наномикронными размерами нами были проведены исследования при малых давлениях рабочего газа, когда не удается зажечь ВЧ-разряд без магнитного поля. Использование управляемого магнитного поля позволило зажечь разряд, стабилизировать его горение, уменьшить диффузию электронов на заземленный электрод и, соответственно, уменьшить напряжение автосмещения и энергию химически активных частиц.

Поскольку по технологическим причинам кремний был покрыт термической пленкой  $\text{SiO}_2$  (толщина 1 мкм), сначала проводилось стравливание пленки  $\text{SiO}_2$  при напряжении автосмещения  $U_{\text{см}} = -80$  В. Скорость травления при этом составляла примерно 0,1 мкм/мин. После этого в камеру добавляли кислород. Вертикальная скорость травления кремния составляла 0,5–1,0 мкм/мин. Отметим, что увеличивать ток разряда  $I_p$  с целью повышения скорости травления опасно, поскольку увеличение тепловой нагрузки приводит к отслоению защитной маски от поверхности  $\text{SiO}_2$  за счет различия коэффициентов теплового расширения материалов.

### Результаты и их обсуждение

При травлении кремния в плазме чистого элегаза наблюдается растрав верхней части образца, а угол наклона стенки к вертикали составляет 20–25° (рис. 1, а). При добавлении небольшого количества кислорода (до 10%) профиль травления становится практически вертикальным (рис. 1, б), а растрав составляет порядка 10% в горизонтальном направлении. Увеличение содержания кислорода до 40% приводит к резкому уменьшению вертикальной скорости травления (рис. 1, в) и увеличению горизонтальной, что приводит к сильному растраву и увеличению линейных размеров канавок.

На рис. 2 приведены зависимости скорости и анизотропии ( $A = V_v/V_g$ , где  $V_v$ ,  $V_g$  — скорость травления в вертикальном и горизонтальном направлениях соответственно) процесса травления от содержания  $\text{O}_2$ , полученные при постоянном давлении  $P$  газовой смеси в камере

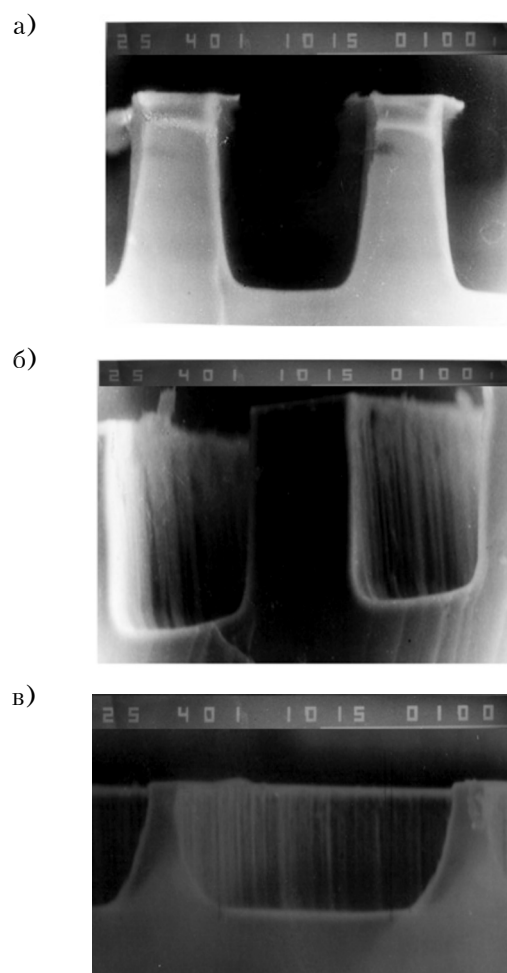


Рис. 1. Профиль стенки при глубинном травлении кремния в среде чистого элегаза (а) и в смеси с кислородом в количестве 10% (б) и 40% (в) при  $P = 2 \cdot 10^{-3}$  Торр,  $I_p = 7,6$  А,  $U_{\text{см}} = -60$  В

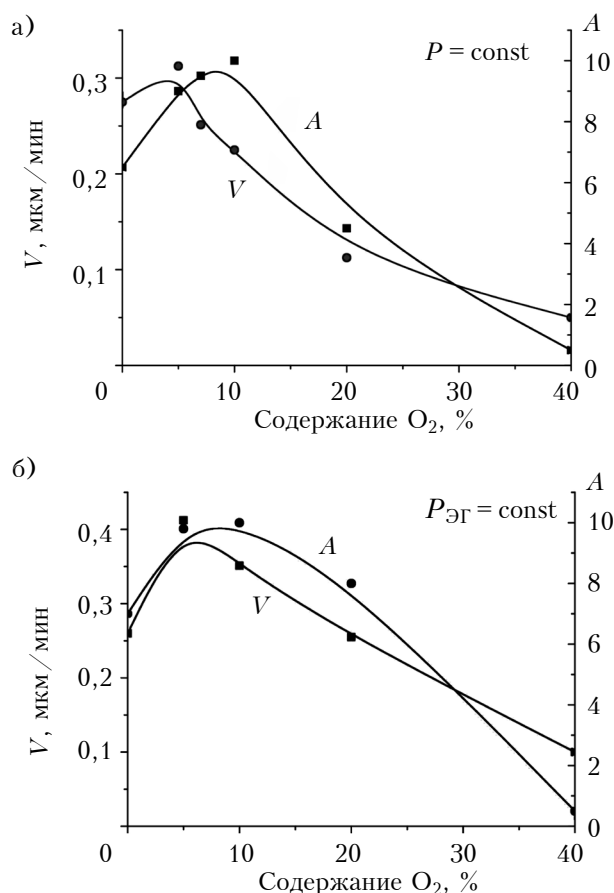


Рис. 2. Зависимость скорости  $V$  и анизотропии  $A$  процесса травления от количества кислорода при  $P = \text{const}$  (а) и  $P_{\text{O}_2} = \text{const}$  (б) ( $I_p = 7,6 \text{ A}$ ,  $U_{\text{см}} = -60 \text{ B}$ )

и при постоянном парциальном давлении элегаза  $P_{\text{ЭГ}}$ . Здесь видно, что при добавлении в камеру реактора незначительного количества кислорода (7–10%) происходит возрастание обоих рассматриваемых параметров, а дальнейшее увеличение содержания  $\text{O}_2$  приводит к их уменьшению. Представленные данные свидетельствуют о том, что кислород играет важную роль в блокировании адсорбции фтора, что позволяет защитить боковые стенки кремния от подтравов.

Увеличение скорости травления при добавлении в объем камеры небольшого количества  $\text{O}_2$  можно пояснить тем, что при взаимодействии гексафторида серы с кислородом происходит рост концентрации атомарного и молекулярного фтора [12]. Дальнейшее увеличение количества кислорода приводит к пассивации поверхности кремния в результате окисления его поверхности, за счет чего уменьшается вертикальная скорость травления по сравнению с горизонтальной и, как следствие, наблюдается уменьшение анизотропии процесса. На рис. 2 видно, что максимумы представленных зависимостей не совпадают: максимум скорости травления наблюдается

при содержании кислорода около 5%, анизотропии — при 10%.

На скорость травления большое влияние оказывает также рабочее давление. Как показано на рис. 3, а, скорость возрастает (практически линейно) в 2,5 раза при увеличении давления в пределах  $(0,3–1,4) \cdot 10^{-3}$  Торр, что коррелирует с результатами, приведенными в [13, 14]. Это объясняется тем, что увеличение количества газа способствует возрастанию количества химически активных частиц, влияющих на скорость травления. Анизотропия ведет себя несколько по-другому: при увеличении давления сначала наблюдается резкий ее рост, а далее она остается практически постоянной.

Не менее интересный результат получен при исследовании влияния магнитного поля на скорость травления и анизотропию (рис. 3, б). При увеличении напряженности магнитного поля до  $12 \cdot 10^2 \text{ A}/\text{м}$  скорость травления кремния при других неизменных параметрах разряда увеличивается практически в 2 раза, а анизотропия сначала увеличивается от 6 до 10, а потом уменьшается до 5, т. е. увеличение напряжен-

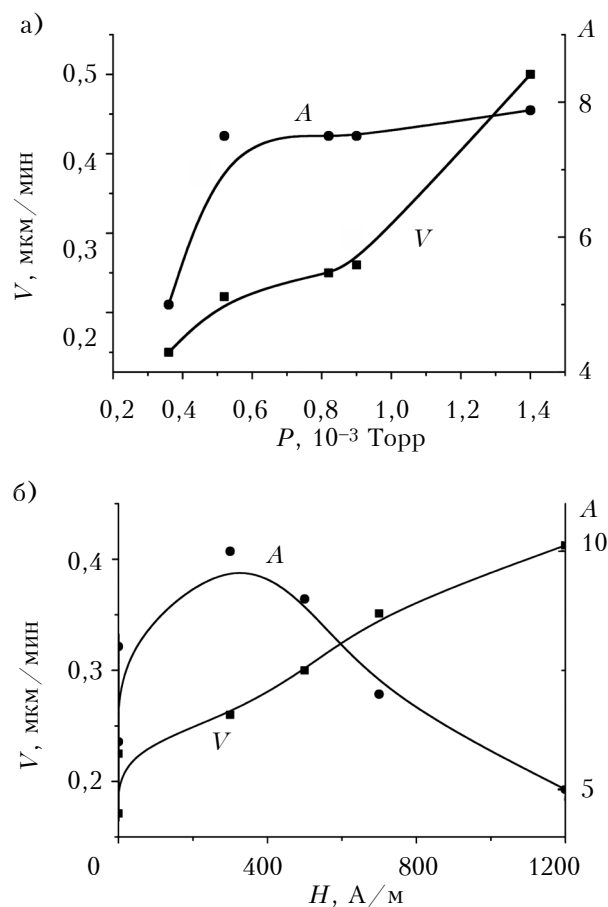


Рис. 3. Зависимость скорости  $V$  и анизотропии  $A$  процесса травления от рабочего давления (а) и от напряженности магнитного поля (б) ( $I_p = 7,6 \text{ A}$ ,  $U_{\text{см}} = -60 \text{ B}$ )

ности магнитного поля приводит к ухудшению анизотропии.

Увеличение напряженности магнитного поля способствует проявлению эффекта «замораживания» электронов, при котором уменьшается их диффузия на поверхность электродов, что увеличивает время их пребывания в объеме плазмы и концентрацию химически активных частиц. С помощью этого эффекта можно управлять напряжением автосмещения, увеличивая или уменьшая диффузию электронов на электроды, изменяя соответственно среднюю энергию химически активных ионов. В [15] показано, что при увеличении напряженности магнитного поля наблюдается уменьшение напряжения автосмещения и, соответственно, средней энергии ионов.

### Выводы

Проведенные исследования показали возможность глубинного травления кремния в плазмохимическом реакторе с управляемым магнитным полем при низкой энергии химически активных ионов. Максимальная скорость травления кремния в газовой смеси  $\text{SF}_6\text{--O}_2$  наблюдается при содержании кислорода 5–7%, а максимальная анизотропия — при 10%. Выбор оптимального режима процесса травления позволил провести травление  $\text{SiO}_2$  на глубину 1 мкм, а кремния на глубину 100 мкм без повреждения защитной маски толщиной 0,4 мкм. При этом, благодаря высокой анизотропии (10), удалось получить практически вертикальные стенки с минимальным изменением поперечных размеров.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Mogab C. J., Adams A. C., Flamm D. L. Plasma etching of Si and  $\text{SiO}_2$  — The effect of oxygen additions to  $\text{CF}_4$  plasmas // Journal of Applied Physics. — 1978. — Vol. 49, iss. 7. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.325382>
2. Гурвич Л.В., Карачевцев Г.В., Кондратьев и др. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. — Москва: Наука, 1974.
3. Федорович О.А., Кругленко М.П., Полозов Б.П. Особенности плазмохимического травления торцов кремниевых пластин для фотоэлектрических преобразователей // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — N 6. — С. 46–49.

4. Riccardo d'Agostino, Daniel L. Flamm Plasma etching of Si and  $\text{SiO}_2$  in  $\text{SF}_6\text{--O}_2$  mixtures // Journal of Applied Physics. — 1981. — Vol. 52, iss. 1. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.328468>

5. Костин Е.Г., Усталов В.В., Федорович О.А. Масс-спектрометрические исследования химически активной плазмы высокочастотных разрядов в управляемых магнитных полях // 36. наук. праць Ін-ту ядерних досліджень НАНУ. — 2004. — N 2. — С. 86–95.

6. Yoo J., Kim K., Thamilselvan M. et al. RIE texturing optimization for thin c-Si solar cells in  $\text{SF}_6/\text{O}_2$  plasma // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2008. — Vol. 41, N 12. — <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/41/12/125205>

7. Khaled A. Alshaltami, Muhammad Morshed, Cezar Gaman et al. Experimental investigation of  $\text{SF}_6\text{--O}_2$  plasma for advancement of the anisotropic Si etch process // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. — 2017. — Vol. 35, iss. 3. — <http://dx.doi.org/10.1116/1.4981785>

8. Fedorovich O.A., Hladkovskiy V.V., Polozov B.P., Kruglenko M.P. The bias voltage and its influence on the etching rate of silicon // Probl. At. Sci. Technol. — 2015. — N 6 (100). — P. 146–150.

9. Усталов В.В., Коновал В.М., Федорович О.А. Плазмохимический реактор с замкнутым дрейфом электронов для производства элементов с субмикронными размерами // Матер. 6-й Междунар. Конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 96)». — Севастополь, Крым, Украина. — 1996. — С. 285–288.

10. Hladkovskiy V.V., Fedorovich O.A. Spectroscopic studies of RF discharge plasma at plasma-chemical etching of gallium nitride epitaxial structures // Ukr. J. Phys. — 2017. — Vol. 62, N 3. — P. 208–213. — <http://dx.doi.org/10.15407/ujpe62.03.0208>

11. Болтовец Н. С., Борисенко А. Г., Иванов В. Н. и др. Формирование мезоструктур 4H-SiC p-i-n-диодов методом ионно-плазменного травления // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — N 5. — С. 45–48.

12. Chase M.W. NIST-JANAF Thermochemical Tables // Journal of Physical and Chemical Reference Data. — 1996. — Vol. 25, iss. 2. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.555992>

13. Гальперин В.А., Данилкин Е.В., Молчанов А.И. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях. — Москва: Бином, 2012.

14. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. — Москва: Энергоатомиздат, 1987.

15. Hladkovskiy V.V., Fedorovich O.A., Polozov B.P., Kruglenko M.P. About peculiarities of self-bias voltage formation in plasmachemical reactors with controlled magnetic fields // Problems of atomic science and technology. — 2015. — N 1, Series: Plasma Physics. — P. 156–160.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 18.05 2017 г.

В. В. ГЛАДКОВСКИЙ, О. А. ФЕДОРОВИЧ

Україна, м. Київ, Інститут ядерних досліджень НАНУ

E-mail: vvglad@yahoo.com

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КИСНЮ НА ШВИДКІСТЬ І АНІЗОТРОПІЮ ГЛИБИННОГО ТРАВЛЕННЯ КРЕМНІЮ В ПЛАЗМОХІМІЧНОМУ РЕАКТОРІ З КЕРОВАНИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ

Наведено результати досліджень впливу кількості кисню в суміші з гексафторидом сірки на швидкість і анизотропію травлення кремнію в плазмохімічному реакторі з керованим магнітним полем. Процес травлення проходить при тиску в робочій камері  $(0,3\text{--}2,0)\cdot 10^{-3}$  Торр, енергія хімічно активних іонів становила 50–80 еВ. Досліджено вплив магнітного поля на швидкість і анизотропію травлення. Показано,



що збільшення напруженості магнітного поля призводить до погіршення анізотронії. Розроблено та оптимізовано процес глибокого плазмохімічного травлення кремнію в плазмохімічному реакторі з керованим магнітним полем в газовій суміші  $SF_6-O_2$ , що дозволило протравити кремній на глибину 100 мкм з анізотронією 10 при використанні захисної нікелевої маски товщиною 0,4–1,0 мкм.

Ключові слова: глибинне травлення кремнію, анізотронія, енергія іонів, плазмохімія, магнітне поле.

DOI: 10.15222/TKEA2017.4-5.40  
UDC 535.5

V. V. HLADKOVSKIY, O. A. FEDOROVICH

Ukraine, Kiev, Institute for Nuclear Research of NASU  
E-mail: vvglad@yahoo.com

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF OXYGEN ON THE RATE AND ANISOTROPY OF DEEP ETCHING OF SILICON IN THE PLASMA-CHEMICAL REACTOR WITH THE CONTROLLED MAGNETIC FIELD

The article presents the research results on the influence of the amount of oxygen in a mixture with sulfur hexafluoride on the rate and anisotropy of the silicon etching in the plasma-chemical reactor with the controlled magnetic field. The etching was performed under the pressure of  $(0,3-2,0) \cdot 10^{-3}$  Torr in the working chamber and the energy of chemically active ions of 50–80 eV. It was possible to etch the silicon to the depth of 100  $\mu m$  with anisotropy 10, using a thick (0.4–1  $\mu m$ ) nickel mask. The obtained results make it evident, that maximums do not coincide for speed of etch and anisotropy. The maximum of etch rate is observed at oxygen maintained at 5%. While the maximum of anisotropy is observed at 10% oxygen. The authors discovered the influence of the magnetic field on the rate and anisotropy of etching. Etch rate of the silicon at the increase of the magnetic-field tension increases virtually twofold at other discharge parameters remaining unchanged. The anisotropy first increases, and then decreases sharply. Thus, the increase of the tension of magnetic field results in worsening of anisotropy. Thus, the process of deep plasma-chemical etching of silicon has been developed and optimized.

Keywords: deep etching of silicon, ion energy, plasma chemistry, anisotropy.

### REFERENCES

1. Mogab C. J., Adams A. C., Flamm D. L. Plasma etching of Si and  $SiO_2$  – The effect of oxygen additions to  $CF_4$  plasmas. *Journal of Applied Physics*, 49, 3796 (1978). <http://dx.doi.org/10.1063/1.325382>
2. Gurvich L.V. et al. *Energii razryva himicheskikh svyazey. Potentsialy ionizatsii i srodstvo k elektronu*. Moscow, Nauka, 1974, 351 p. (Rus)
3. Fedorovich O.A., Kruglenko M.P., Polozov B.P. [Peculiarity of plasmachemical etching of silicon plate edges of photoelectric converters]. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*, 2009, no 6, pp. 46-49. (Rus)
4. Riccardo d'Agostino, Daniel L. Flamm. Plasma etching of Si and  $SiO_2$  in  $SF_6-O_2$  mixtures. *Journal of Applied Physics*, 1981, vol. 52, p.162. <http://dx.doi.org/10.1063/1.328468>
5. Kostin E.G., Ustalov V.V., Fedorovich O.A. *Zbirnyk naukovykh Prats of Institute for Nuclear Research*, 2004, no. 2 (13), pp. 86-95. (Rus)
6. J. Yoo, K. Kim, M. Thamilselvan, N. Lakshminarayn, Y. K. Kim K. J. Yoo, J. Yi. RIE texturing optimization for thin c-Si solar cells in  $SF_6/O_2$  plasma. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41, 125205 (2008). [<http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/41/12/125205>]
7. Khaled A. Alshaltami, Muhammad Morshed, Cezar Gaman, Jim Conway, Stephen Daniels. Experimental investigation of  $SF_6-O_2$  plasma for advancement of the anisotropic Si etch process. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2017, vol. 35, iss. 3. <http://dx.doi.org/10.1116/1.4981785>
8. Fedorovich O.A., Hladkovskiy V.V., Polozov B.P., Kruglenko M.P. The bias voltage and its influence on the etching rate of silicon. *Probl. At. Sci. Technol.*, 2015, no. 6 (100), pp. 146-150.
9. Ustalov V.V., Konoval V.M., Fedorovich O.A. *Proc. of the 6th Int. konfer. "Microwave & Telecommunication Technologies (Krymiko 96)"*, Sevastopol', Crimea, Ukraine, 1996, pp. 285-288. (Rus)
10. Hladkovskiy V.V., Fedorovich O.A. Spectroscopic studies of RF discharge plasma at plasma-chemical etching of gallium nitride epitaxial structures. *Ukr. J. Phys.*, 2017, vol. 62, no. 3, pp. 208-213. <http://dx.doi.org/10.15407/ujpe62.03.0208>
11. Boltovets N. S., Borisenko A. G., Ivanov V. N., Fedorovich O. A., Krivuca V. A., Polozov B. P. [Forming of 4HSiC p-i-n-diodes mesastructures by the ion-plasmous etching method]. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*, 2009, no. 5, pp. 45-48. (Rus)
12. Chase M.W. NIST-JANAF Thermochemical Tables. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1996, vol. 25, iss. 2. <http://dx.doi.org/10.1063/1.555992>
13. Gal'perin V.A., Danilkin E.V., Molchanov A.I. *Processy plazmennogo travleniya v mikro- i nanotekhnologiyakh*. Moscow, Binom, 2012, 283 p. (Rus)
14. Danilin B.S., Kireev V.Ju. *Primenenie nizkotemperaturnoy plazmy dlya travleniya i ochistki materialov*. Moscow, Energoatomizdat, 1987, 264 p. (Rus)
15. Hladkovskiy V.V., Fedorovich O.A., Polozov B.P., Kruglenko M.P. About peculiarities of self-bias voltage formation in plasmachemical reactors with controlled magnetic fields. *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 1, Series: Plasma Physics, 2015, pp. 156-160.



Л. А. ПИРОЖЕНКО, С. С. ПОЯРКОВА, к. ф.-м. н. А. П. ЩЕРБАНЬ,  
Ю. В. ГОРБЕНКО, к. ф.-м. н. А. В. РЫБКА

Украина, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»

E-mail: shcherban@kipt.kharkov.ua

## ПАССИВАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОЧИСТЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ: ЦИНКА, КАДМИЯ, СВИНЦА

*Разработаны новые составы и режимы для химического травления и пассивации поверхности высокочистых гранул Zn, Cd и Pb с использованием неводных растворов электролитов. Это позволило получить гранулы металлов с тонкими сплошными устойчивыми оксидными пленками, которые можно хранить в обычных условиях на протяжении длительного времени без изменения состояния поверхности. Показана возможность применения смеси глицерина с ДМФА в качестве охлаждающей жидкости в процессе получения гранул свинца.*

**Ключевые слова:** химическая пассивация, оксидные пленки, высокочистые металлы, гранулы, кадмий, цинк, свинец.

Металлы технической чистоты, которые получают для дальнейшего использования в различной форме (в виде чушек, стержней, фольги, листов, дробы, гранул, порошка и т. д.), покрыты самопассивирующей оксидной пленкой. Эта пленка в той или иной мере защищает металл от дальнейшего окисления и разрушения при длительном хранении в условиях свободного доступа воздуха, однако имеет свойство хемосорбировать влагу, углекислый газ и активные компоненты среды хранения. Для высокочистых металлов, таких как цинк, кадмий, свинец, используемых в качестве исходных компонентов при выращивании полупроводниковых и сцинтилляционных кристаллов (CdTe, CdZnTe, ZnSe, (Cd, Zn, Pb)WO<sub>4</sub>, (Cd, Zn, Pb)MoO<sub>4</sub> и др.), очень важным является надежность защиты их поверхности от окисления и сорбции примесей из атмосферы. Поскольку при синтезе материалов применение гранулированных исходных металлов позволяет достичь более равномерного распределения компонентов шихты, при выращивании монокристаллов с заданными свойствами требуется предварительное измельчение крупноразмерных слитков высокочистых компонентов и очистка химическим травлением. Комплексные процессы рафинирования и гранулирования высокочистых Cd, Zn и Pb были разработаны в ННЦ ХФТИ [1], достигнутая чистота кадмия и цинка составляла более 99,9999, а свинца — 99,9996 мас. %.

Процесс получения гранул Zn, Cd и Pb предполагает быстрое изменение агрегатного состояния материала из жидкого в твердое. При за-

твердевании объем металлов уменьшается на 2–6%, вследствие чего в их структуре, как правило, появляются макро- и микродефекты, увеличивающие вероятность разрушения металлической поверхности во время хранения. Во избежание этого рекомендуется дополнительная химическая обработка гранул, сочетающая полирующее травление с процессом пассивации [2, с. 29] и позволяющая хранить гранулы без специальных мер защиты в обычных условиях.

Химический метод пассивации заключается в использовании растворов, состав которых аналогичен полирующим и которые обеспечивают скорость образования защитной пленки в несколько раз выше скорости ее растворения. Зачастую в качестве защитных выступают оксидные пленки [3, с. 50]. Для рассматриваемых металлов активными окислительными компонентами травящих растворов могут быть азотная кислота, бихромат калия, перекись водорода, бром, хлор, йод и др. Для однородности травления на любом участке обрабатываемой поверхности используются как «мягкие» растворители, гарантирующие невысокую скорость реакции и обеспечивающие фиксируемый съем металла, так и более агрессивные «быстрые». Для получения полированной, гладкой поверхности время обработки в концентрированных водных «быстрых» травителях обычно ограничивается несколькими секундами. Для улучшения контроля процесса травления в раствор добавляется снижающий активность реагентов органический растворитель с низкой диэлектрической проницаемостью, для усиления полирующего эффекта — компонент с

повышенной вязкостью. При этом важно, чтобы продукты реакции хорошо растворялись в этих органических добавках. Использование органических растворителей для отмывки гранул после травления предотвращает процесс гидролиза продуктов окисления. Применение безводных травящих растворов зачастую меняет направление реакции, происходящей на поверхности металла, и способствует образованию тонкого защитного барьера, не содержащего окклюдируемую (скрытую) воду. Выдержка пассивированных гранул в свежих порциях органического компонента без доступа воздуха способствует созреванию прочных защитных слоев.

Поверхностная пленка должна быть максимально тонкой, сплошной, прочной, пластичной, обладать хорошей адгезией к металлу, коэффициенты термического расширения пленки и основного металла должны быть близки между собой.

Условие сплошности выполняется тогда, когда молекулярный объем химического поверхностного соединения больше объема металла, израсходованного на образование оксида. Это соотношение известно как фактор Пиллинга — Бедвордса, которое выражается следующим образом [3, с. 42]:

$$V_o/V_m = M_o \rho_m / (n A_m \rho_o) > 1, \quad (1)$$

где  $V_o$  — объем моля оксида;

$V_m$  — объем металла;

$M_o, \rho_o$  — молярная масса и плотность оксида;

$n$  — число молей металла, вступающих в реакцию при образовании одного моля оксида;

$A_m, \rho_m$  — атомная масса и плотность металла.

Сплошные и устойчивые пленки образуются при  $V_o/V_m = 1,2 - 1,6$ . При  $V_o/V_m < 1$  пленки получаются не сплошными, при  $V_o \gg V_m$  (более чем в 2,5 раза) значительное увеличение объема оксида может привести к растрескиванию и отслаиванию созданной пленки. Расчетные значения соотношения объемов оксида и израсходованного на его образование металла для Pb, Zn и Cd, при которых можно получить качественные пленки, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения  $V_o/V_m$ , при которых обеспечивается получение сплошных и устойчивых пленок

Металл	Оксид	$V_o/V_m$
Pb	PbO	1,28
	PbO <sub>2</sub>	1,39
	Pb <sub>2</sub> O	1,41
Cd	CdO	1,21
	Cd <sub>2</sub> O	1,13
Zn	ZnO	1,55

Для высокочистых кадмия, цинка и свинца особенности пассивации поверхности изучены недостаточно и требуют специфического подхода и дальнейших исследований. Целью данной работы является разработка оптимальных схем пассивации гранул этих металлов для повышения их устойчивости к атмосферной коррозии.

### Объекты и методика эксперимента

В качестве объектов исследования использовали гранулы Cd и Zn чистотой 99,9999 мас. %, а Pb — 99,9996 мас. %, полученные комплексным дистилляционным методом глубокого рафинирования в вакууме [4–7] на специально разработанном устройстве. Гранулы каплевидной формы диаметром 3–5 мм и длиной 4–6 мм получали путем прокапывания жидкого металла в контейнер с охлаждающей жидкостью (дистиллированной водой) температурой 25–40°C [1].

Для приготовления травящих растворов использовали дистиллированную и бидистиллированную воду, кислоты и растворители квалификации «ч.д.а.» и «х.ч.». Содержание указанных компонентов выражалось в нормальности (N) либо в объемных процентах.

Измерение размеров гранул для определения толщины стравленной поверхности производилось с помощью микрометра МКЦ (5)–25–0,001. Металлографический контроль состояния поверхности проводили с помощью микроскопов МБС-9 и MTU253. Качество полученных пассивирующих пленок контролировалось каждые пять дней на протяжении двух месяцев и затем один раз в месяц.

Отметим, что для синтеза полупроводниковых монокристаллов наиболее приемлемыми являются тонкие невидимые пленки толщиной от мономолекулярного слоя до 40 нм. При проверке устойчивости к атмосферной коррозии оксидных пленок, созданных на гранулах Cd, Zn и Pb, учитывалось, что цвет побежалости свидетельствует о том, что их толщина достигает 40–500 нм, а видимой пленка становится при толщине свыше 500 нм [8–11].

### Полученные результаты и их обсуждение Zn

Цинк относится к группе металлов повышенной термодинамической нестабильности, но при этом обладает прекрасной коррозионной стойкостью в воздушной атмосфере и в большинстве естественных водных сред. В сухом воздухе на поверхности цинка адсорбированный слой кислорода быстро превращается в оксид цинка. Влага, углекислый газ, химические примеси в составе воздуха способствуют возникновению малорастворимых карбонатов, гидроокси-

сей, сульфидов, упрочняющих образовавшуюся пленку на поверхности металла даже на участках со структурными дефектами.

В процессе получения гранул расплавленные капли цинка контактируют с дистиллированной водой, содержащей растворенный кислород. Пассивирующий слой в этом случае содержит кроме оксидов еще и малорастворимую гидроокись цинка. Решающую роль в создании слоя играет чистота используемой воды, уровень ее pH и температура. Поскольку присутствие следов Cu, Sb, Mg, Ca может привести к адсорбции этих веществ оксидом цинка, в качестве охлаждающей жидкости использовали свежеприготовленную бидистиллированную воду.

Коррозионная устойчивость Zn сильно зависит от температуры. В температурном интервале 65–70°C дистиллированная вода способствует изменению природы защитной пленки. При более низкой температуре образовавшийся в начальной стадии оксид цинка сохраняет признаки студенистости с хорошей адгезией к поверхности гранул. При температуре воды около 70°C структура пленки приобретает зернистый кристаллический характер и адгезия ухудшается [2, с. 217; 8, с. 166]. При более высокой температуре в воде резко уменьшается содержание кислорода, и при 95°C и выше образуется плотная пленка с высокими защитными свойствами.

При необходимости длительного хранения получаемых гранул цинка в нормальных условиях возможна дополнительная их обработка, обеспечивающая пассивацию с ничтожно малой толщиной оксидного слоя.

Рекомендуемые реагенты, кроме традиционных кислот для придания блеска, устойчивости к коррозии и пластичности полученных защитных слоев, содержат поверхностно-активные вещества, ингибиторы травления и водорастворимые полимеры для увеличения вязкости растворов [4, с. 384; 5, с. 432–437; 6, с. 88]. Стойкость цинка в атмосферных условиях значительно увеличивается в результате пассивирования в хроматных или иных растворах. В связи с экологической опасностью хроматов разработаны пассивирующие конверсионные покрытия на основе соединений с Al, Ni, Mo [12]. Однако в случае металлов особой чистоты подобные составы неприменимы, поскольку оксиды, образованные на поверхности, содержат хемосорбированные следы компонентов травителя.

При пассивации поверхности высокочистых металлов важным является как удаление существующей загрязненной оксидной пленки, образующейся при гранулировании, так и создание новой стабильной пассивирующей оксидной

пленки, обеспечивающей отсутствие загрязнения компонентами травителя.

Для Zn высокой чистоты рекомендуется обработка в дымящейся азотной кислоте в течение 5–10 с [13, с. 224]. В качестве ингибитора травления нами предложено использовать отмывочный раствор тиомочевины, что позволяет быстро прекратить химическую реакцию на поверхности и получить стабильную пассивную пленку. Конечным этапом является отмык образцов в изопропанол для удаления следов воды.

Обработка гранул Zn в более «медленном» растворе 10N HNO<sub>3</sub> в диметилформамиде (ДМФА) гарантирует появление зеркально-полированной пассивированной поверхности. При длительности травления от 20 до 40 с сглаживается мелкий рельеф поверхности и обеспечивается образование тонкого прозрачного защитного слоя, устойчивого к потускнению (воздушной коррозии) в течение более 60 дней (рис. 1). Более высокое содержание ДМФА в растворе приводит к появлению зернистой структуры при сохранении зеркального блеска гранул (рис. 2).

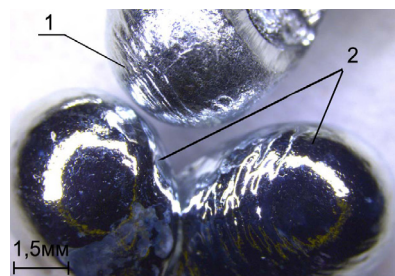


Рис. 1. Гранулы цинка без пассивирующей пленки (1) и с пленкой, химически нанесенной после гранулирования (2)

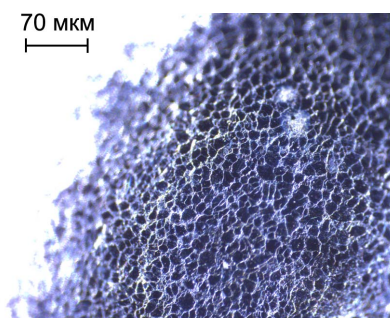


Рис. 2. Зернистая структура поверхности гранул цинка

Ранее хороший результат был получен нами для полученного в инертной атмосфере аргона монокристаллического Zn особой чистоты при пассивации образцов в более «медленном» бромвыделяющем травителе на основе HNO<sub>3</sub>:HBr:ЭГ (этиленгликоль) (10:50:40) с от-



мывкой в ДМФА. Стабильность полученной поверхности, независимо от механических дефектов, сохранялась на протяжении четырех лет хранения в обычных условиях. Такую же схему обработки применяли и для гранулированного Zn. Время обработки может варьироваться от 20 до 60 с в зависимости от степени рельефности гранул.

### Cd

В процессе получения гранул кадмия нужно учитывать то, что его способность к самопассивации невелика. Защитные свойства пленки, произвольно образующейся на поверхности гранул, сохраняются всего два-три дня, а далее идет ее наращивание продуктами атмосферной коррозии в виде гидрокарбонатов.

В процессе исследования различных пассивирующих составов для Cd были отобраны растворы на основе  $\text{HNO}_3$  и  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Добавка органических растворителей обеспечивает более стабильное протекание процесса пассивации. Действие травителя не прекращается немедленно после изъятия образца из раствора. Правильный выбор растворов для отмывки обеспечивает устойчивость образованной пассивирующей пленки.

Исследован процесс травления гранул Cd в растворе 7N  $\text{HNO}_3$  в ацетоне. Использование ацетона в качестве промывной жидкости обеспечивает сохранение полученной блестящей полированной поверхности не более семи дней, а отмывка после травления в ДМФА гарантирует устойчивость блеска и сплошность полученной пленки в течение 70 дней и более. Аналогичный результат достигается при использовании более «медленного» бромвыделяющего травителя  $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HBr}:\text{ЭГ}$  (6:54:40). Время травления может быть увеличено до 60–90 с в зависимости от степени дефектности поверхности гранул.

На рис. 3 показано состояние поверхности образца «свидетеля» (1) и пассивированных гранул Cd в различных растворах (2, 3) после хранения в течение 60 дней на воздухе.

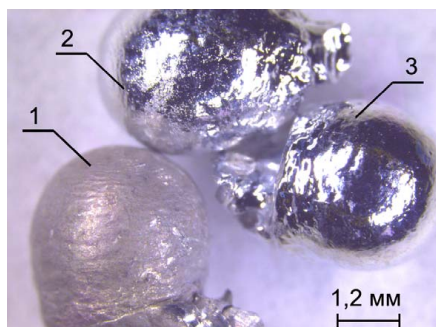


Рис. 3. Гранулы кадмия без пассивации (1) и пассивированные в растворе 7N  $\text{HNO}_3$  в ацетоне (2) и в бромвыделяющем травителе (3) после 60 дней хранения

### Pb

Хорошая коррозионная стойкость свинца при хранении в обычных условиях объясняется формированием на его поверхности сравнительно толстых, прочно связанных с металлом пленок, представляющих собой продукты коррозии. Самопроизвольно возникающий защитный слой мало зависит от примесей в свинце и от степени его чистоты. Исключение составляют Zn и Bi, которые ускоряют атмосферную коррозию при хранении.

Обычно химическая пассивация свинца достигается созданием на его поверхности защитных пленок на основе малорастворимых соединений ( $\text{PbSO}_4$ ,  $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{PbS}$ ,  $\text{PbCrO}_4$ ,  $2\text{Pb}(\text{OH})_2 \cdot \text{PbCO}_3$  и т. п.), позволяющих расширять возможности эксплуатации свинцовых изделий в различных условиях.

Авторы [8, 14] исследовали качество солевой и окисно-гидроксидной пассивации Pb в зависимости от pH применяемых растворов, концентрации анионов, создающих нерастворимую пленку, условий дегидратации и старения полученных слоев. Было отмечено постепенное фазовое превращение таких пленок в оксиды переменного состава. Однако для высокочистого свинца такой способ пассивации применять нельзя.

Использование воды в качестве охлаждающей жидкости согласно предложенной в [1] схеме получения гранул свинца выдвигает определенные требования к ее составу, поскольку Pb корродирует в дистиллированной воде в присутствии кислорода и углекислого газа. Поверхность гранул, не прошедших дополнительную обработку, практически сразу, в течение двух-трех часов, покрывается черным бархатным налетом субоксида  $\text{Pb}_2\text{O}$ . Рентгенографические исследования показали, что это слой твердого раствора Pb в PbO.

В [15] исследованы процессы, протекающие в наноразмерной пленке PbO, при различных значениях ее толщины (10–140 нм), интенсивности и времени воздействия света. Показано, что оксид свинца, сформированный на поверхности металла при облучении световыми волнами различной длины, восстанавливается в течение 1–160 мин с образованием нестехиометрических оксидов Pb–PbO. Увеличение толщины пленок свыше 60 нм приводит к замедлению фотостимулированного восстановления. Цвет окисленной поверхности постепенно приобретает желтовато-оранжевые оттенки, характерные для оксидов свинца более высокой валентности:  $\text{PbO} \rightarrow \text{Pb}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{PbO}_2$ .

С учетом сказанного выше была поставлена задача создания на поверхности гранул высокочистого свинца прочных беспористых изолирующих

щих пленок с повышенной стойкостью к атмосферной коррозии.

Наилучшими оксидными пассиваторами в кислой среде являются сильные окислители в сочетании с мягкими растворителями оксидов. В качестве полирующе-пассивирующего раствора был опробован известный «быстрый» травитель Уорнера  $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCOOH}$  с отмывкой в воде [13, с. 203; 16, с. 92]. После травления поверхность металла оставалась блестящей около одного часа. Продолжительность травления составляла несколько секунд при трех-четырёхкратном окутании. Вместо обычно рекомендуемой дополнительной обработки в растворах мыла, жирных органических кислотах нами была применена отмывка с использованием концентрированной азотной кислоты для первого ополаскивания, при которой происходит пассивация очищенной полированной поверхности Pb. Для сохранения пассивирующей пленки дальнейшая отмывка водой исключается, а наилучший результат достигается многократным ополаскиванием гранул в метаноле.

Применение такой схемы пассивирования поверхности слитков высокочистого археологического свинца [6] обеспечило сохранение полированной поверхности, не тускнеющей в течение четырех лет.

Особенностью Pb является возможность его взаимодействия с глицерином. В результате взаимодействия оксида свинца с безводным глицерином возникает слой глицерата свинца. Схватывание такого гелеобразного соединения происходит в течение 30–40 мин, а через несколько часов образуется твердый газо- и водонепроницаемый слой с высокой механической прочностью. Глицерин является хорошим растворителем многих соединений свинца. Его присутствие в составе травителей создает среду повышенной вязкости, усиливает полирующий, сглаживающий эффект, при этом происходит замедление скорости процесса травления, что облегчает проведение контроля поверхности [16, с. 284].

Сложный травитель на основе  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{HCOOH}$  с добавкой глицерина (10:60:20:10) позволяет получить полированную поверхность гранул Pb, не тускнеющую в течение примерно 30 дней. При использовании для удаления следов реактива с поверхности гранул инертного апротонного растворителя ДМФА происходит слабое селективное травление, выявляющее первичную литую структуру гранул. Если же в качестве первой промывочной жидкости используется смесь глицерина и ДМФА, зернистость

структуры не проявляется. Следует отметить, что в отличие от ранее рекомендованных схем травления с понижением температуры процесс пассивации проводился при комнатной температуре, а продолжительность выдержки гранул в растворе была больше в 2,5–3 раза. Число обработок с промежуточной отмывкой в ДМФА может составлять 3–5 раз в зависимости от сложности удаляемого рельефа поверхности гранул.

На рис. 4 приведена фотография поверхностей образца-свидетеля и полированных-пассивированных в разработанном травителе гранул по истечении 30 дней хранения.

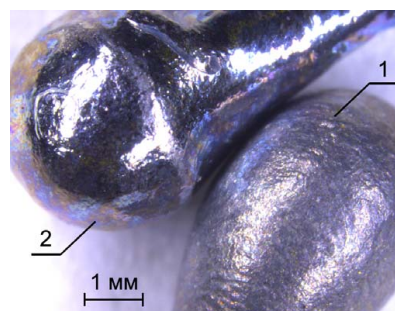


Рис. 4. Гранулы свинца без пассивации (1) и пассивированные (2, 3) после 30 дней хранения

Особенностью разработанного состава травителя является его чувствительность к чистоте обрабатываемого свинца. При одинаковых режимах обработки (состав травящей смеси, температура, время травления, кратность отмывки) свинец технической чистоты (99,96%) и свинец повышенной чистоты (99,9996%) различаются оттенками и яркостью полученных пассивирующих пленок. Микрогальванические поры менее чистого свинца с примесными элементами вызывают в поверхностном слое некоторую опалесценцию прозрачного оксида уже на десятый день, при хранении около 20 дней он приобретает желтоватый оттенок. Высокочистый свинец остается серебристо-серым в течение примерно 30 дней, а более продолжительная выдержка на воздухе приводит к уменьшению степени прозрачности оксидного слоя.

Проведенные исследования также показали возможность получения неокисляющихся при хранении более 50 дней гранул свинца при использовании раствора глицерина с ДМФА ( $\rho = 1,17$ ) в качестве охлаждающей жидкости. Специфическое взаимодействие свинца с глицерином способствует самопассивации гранул в момент их получения и позволяет отказаться от дополнительной химической обработки с сохранением качества антикоррозионной защиты. Были подобраны оптимальные соотношения глицери-



на и ДМФА в растворе, температурные и отмывочные режимы одновременной обработки больших количеств гранул свинца.

### Выводы

В результате проведенных исследований было предложено использовать органические растворы для химической пассивации высокочистых гранулированных Zn, Cd и Pb, что позволяет исключить гидролиз получаемых защитных пленок. Применение чистых по катионному и анионному составу органических растворителей в качестве промывочной жидкости предотвращает хемосорбцию ионов, присутствующих в применяемой традиционно дистиллированной воде, что сохраняет исходную чистоту гранулированных металлов.

Разработанные составы травителей и режимы травления обеспечивают одновременное полирование и пассивацию поверхности высокочистых гранул Zn, Cd и Pb. Выравнивание неоднородностей рельефа поверхности гранул в сочетании с глубокой очисткой и отмывкой в органических растворителях способствует формированию тонких и пластичных защитных слоев оксидов, устойчивых к атмосферной коррозии.

Химическая пассивация позволяет в обычных условиях и без специальных мер защиты хранить более полугода гранулы Zn и Cd и около одного месяца гранулы Pb без изменения состояния их поверхности. Применение смеси глицерина с диметилформамидом в качестве охлаждающей жидкости в процессах получения гранул Pb обеспечивает самопассивацию поверхности металла, что позволяет исключить дополнительную пассивацию с сохранением качества коррозионной защиты.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Щербань А.П., Ковтун Г.П., Горбенко Ю.В. и др. Получение высокочистых гранулированных металлов: кадмия, цинка, свинца // Технология и конструирование в

электронной аппаратуре. — 2017. — №1–2. — С. 55–60. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЭА2017.1-2.55>

2. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии. — Москва: Физматлит, 2006.

3. Томашов Н.Д., Чернова Г.П. Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные сплавы. — Москва: Металлургия 1986.

4. Щербань А.П. Получение высокочистых металлов для производства низкофонового сцинтилляционных детекторов редких событий // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. — 2011. — № 6 (19). — С. 3–10.

5. Kovtun G.P., Shcherban A.P., Danevich F.A. et al. Production of radiopure natural and isotopically enriched cadmium and zinc for low background scintillators // Functional materials. — 2011. — Vol. 18, N 1. — P. 121–127.

6. Бойко Р.С., Вирич В.Д., Даневич Ф.А. и др. Глубокая очистка археологического свинца // Неорганические материалы. — 2011. — Т. 47, № 6. — С. 722–726.

7. Пат. 94547 України. Пристрій для рафінування металів дистиляцією у вакуумі / Г.П. Ковтун, О.П. Щербань, Д.О. Солопихін. — 2011. — Бюл. № 9.

8. Шпраер Л.Л. Коррозия: Справочник. — Москва: Металлургия, 1981.

9. Сангвал К. Травление кристаллов. — Москва: Мир, 1990.

10. Гальванотехника. Справочник / Под ред. А.М. Гинберга и др. — Москва: Металлургия, 1987.

11. Липкин Я.Н., Бершадская Т.М. Химическое полирование металлов. — Москва: Машиностроение, 1988.

12. Ануфриев Н.Г. Электрохимическая оценка защитной способности конверсионных покрытий на цинке // Коррозия: материалы, защита. — 2010. — № 11. — С. 32–37.

13. Смитлз К. Дж. Металлы: Справочник. — Москва: Металлургия, 1980.

14. Экилик В.В., Тихомирова К.С., Бережная А.Г. Анодное растворение и пассивация свинца в растворах сульфата натрия // Физикохимия поверхности и защита материалов. — 2011. — Т. 47, № 3. — С. 302–310.

15. Суевой Э.П., Бин С.И., Борисова Н.В. Восстановление наноразмерных слоев оксида свинца под действием света // Коррозия: материалы, защита. — 2009. — № 11. — С. 1–5.

16. Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления: Справочник. — Москва: Металлургия, 1988.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 20.07 2017 г.

Л. О. ПИРОЖЕНКО, С. С. ПОЯРКОВА, О. П. ЩЕРБАНЬ, Ю. В. ГОРБЕНКО, О. В. РИБКА

Україна, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»,

E-mail: rybka@kipt.kharkov.ua

## ПАСИВАЦІЯ ПОВЕРХНІ ВИСОКОЧИСТИХ ГРАНУЛЬОВАНИХ МЕТАЛІВ: КАДМІЮ, ЦИНКУ, СВИНЦЮ

Розроблено нові режими хімічного травлення і пасивації поверхні високочистих гранульованих Zn, Cd і Pb з використанням неводних розчинів електролітів. Це дозволило отримати гранули металів з тонкими суцільними стійкими оксидними плівками, які можна зберігати в звичайних умовах протягом тривалого часу без зміни стану поверхні. Показано можливість застосування суміші гліцерину з ДМФА як охолоджуючої рідини в процесі отримання гранул свинцю.

Ключові слова: хімічна пасивація, оксидні плівки, метали високої чистоти, гранули, кадмій, цинк, свинець.

DOI: 10.15222/TKEA2017.4-5.45  
UDC 544.625.7; 621.794.4

L. A. PIROZHENKO, S. S. POYARKOVA,  
A. P. SHCHERBAN, Yu. V. GORBENKO, A. V. RYBKA

Ukraine, National Science Center «Kharkiv Institute of Physics and Technology»

E-mail: rybka@kipt.kharkov.ua

## SURFACE PASSIVATION OF HIGH PURITY GRANULAR METALS: ZINC, CADMIUM, LEAD

*For the high purity metals (99.9999%), such as zinc, cadmium, and lead, which are widely used as initial components in growing semiconductor and scintillation crystals (CdTe, CdZnTe, ZnSe, (Cd, Zn, Pb) WO<sub>4</sub>, (Cd, Zn, Pb) MoO<sub>4</sub> et al.), it is very important to ensure reliable protection of the surface from oxidation and adsorption of impurities from the atmosphere. The specific features of surface passivation of high purity cadmium, lead and zinc are not sufficiently studied and require specific methodologies for further studies. The use of organic solutions in the schemes of chemical passivation of the investigated metals avoids hydrolysis of the obtained protective films. The use of organic solvents with pure cation and anion composition as the washing liquid prevents chemisorption of ions present in the conventionally used distilled water. This keeps the original purity of the granular metals.*

*Novel compositions of etchants and etching scheme providing simultaneous polishing and passivation of high purity granular Zn, Cd and Pb are developed. Chemical passivation allows storing metals in the normal atmospheric conditions for more than half a year for Zn and Cd and up to 30 days for Pb without changing the state of the surface. The use of the glycerol-DMF solution in the processes for obtaining Pb granules provides self-passivation of metal surfaces and eliminates the additional chemical processing while maintaining the quality of corrosion protection.*

**Keywords:** chemical passivation, oxide films, high-purity metals, granules, cadmium, zinc, lead.

### REFERENCES

1. Shcherban A.P., Kovtun G.P., Gorbenko Y.V., Solopikhin D.A., Virich V.D., Pirozhenko L.A. Production of high purity granular metals cadmium, zinc and lead. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2017, no. 1-2, pp. 55-60. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2017.1-2.55> (Rus)
2. Semyonov I.V., Florianovich G.M., Khoroshilov A. V. *Korroziya i zashchita ot korrozii* [Corrosion and corrosion protection]. Moscow, FIZMATLIT, 2006, 376 p. (Rus)
3. Tomashov N.D., Chernova G.P. *Teoriya korrozii i korroziionnostoykiye konstruktivniye splavy* [Theory of corrosion and corrosion-resistant structural alloys]. Moscow, Metallurgiya, 1986, 359 p. (Rus)
4. Shcherban A.P. [Obtaining high purity metals for low background scintillating detectors of rare events]. *Problems of atomic science and technology. Ser. Vacuum, Pure Materials, Superconductors*, 2011, no. 6 (19), pp. 3-10. (Rus)
5. Kovtun G.P., Shcherban A.P., Danevich F.A., Virich V.D., Zelenskaja V.I., Boiko R.S., Danevich F.A., Kudovbenko V.M., Nagorny S.S. Production of radiopure natural and isotopically enriched cadmium and zinc for low background scintillators. *Functional materials*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 121-127.
6. Boiko R.S., F.A. Danevich, G.P. Kovtun, Dovbush T.I., Kovtun G.P., Nagorny S.S., Nisi S., Samchuk A.I., Solopikhin D.A., Shcherban' A.P. Ultrapurification of archaeological lead. *Inorganic Materials*, 2011, Vol. 47, no. 6, pp. 645-648.
7. Kovtun G.P., Shcherban A.P., Solopikhin D.A. *Prystriy dlya raphinuвання металів дистильації у вакуумі* [A device for refining metals by distillation in a vacuum]. Patent Ukraine, no 94547, Bul. 9, 2011. (Ukr)
8. Shraer L.L. *Korroziya: Spravochnik* [Corrosion: Reference book]. Moscow, Metallurgiya, 1981, 632 p. (Rus).
9. Sangval K. *Travleniye kristallov* [Etching of crystals]. Moscow, Mir, 1990, 492 p. (Rus).
10. *Galvanotekhnika: Spravochnik* [Electroplating. Reference book]. Ed. by A.M. Ginberg et al. Moscow, Metallurgiya, 1987, 735 p. (Rus)
11. Lipkin Ya. N., Bershadskaya T. M. *Khimicheskoye polirovaniye metallov* [Chemical polishing of metals]. Moscow, Машиностроение, 1990, 112 p. (Rus).
12. Anufriev N.G. [Electrochemical evaluation of the protective ability of conversion coatings on zinc]. *Korroziya: Materialy, Zashchita*, 2011, no. 11, pp. 32-37. (Rus).
13. Smitls K. J. *Metally: Spravochnik* [Metals. Reference book]. Moscow, Metallurgiya, 1990, 447 p. (Rus)
14. Ekilik V. V., Tikhomirova K. S., Berezhnaya A. G. Anodic dissolution and passivation of lead in sodium sulfate solutions. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, vol. 47, no. 3, 354. <https://doi.org/10.1134/S207020511103004X>
15. Surovoi E.P., Bin S.V., Borisova N.V. Reduction of nanosize lead oxide layers under light action. *Korroziya: Materialy, Zashchita*, 2009, no. 11, pp. 1-5. (Rus)
16. Bekkert M., Klemm Kh. *Sposoby metallograficheskogo travleniya: Spravochnik* [Methods of metallographic etching: Reference book]. Moscow, Metallurgiya, 1990, 400 p. (Rus)

А. В. МАМЫКИН, д. ф.-м. н. А. Л. КУКЛА, А. С. МАЙСТРЕНКО,  
к. ф.-м. н. Е. П. МАЦАС, Л. М. МАТВИЕНКО

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины  
E-mail: kukla@isp.kiev.ua

## СПОСОБ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ОКТАНОВОГО ЧИСЛА БЕНЗИНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРТАТИВНОГО СПЕКТРОИМПЕДАНСНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ И МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

*Предложен способ определения электрофизических характеристик электроизоляционных жидкостей на примере бензина разных марок, основанный на спектроимпедансных измерениях конденсаторной электрохимической ячейки, заполненной исследуемой жидкостью. Приложение синусоидального тестирующего напряжения в области частот 0,1 – 10 Гц обеспечивает большую точность измерений в сравнении с известными традиционными методами. Разработан и сконструирован портативный измеритель полного электрического сопротивления (импеданса) диэлектрических жидкостей. Предложен и протестирован подход для экспрессной оценки октанового числа автомобильных бензинов с помощью спектроимпедансных измерений при использовании статистических методов анализа многомерных данных.*

*Ключевые слова:* импедансная спектроскопия, автомобильный бензин, удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость, статистический анализ.

Наиболее важной эксплуатационной характеристикой автомобильного бензина является его детонационная стойкость (способность топлива противостоять самовоспламенению при сжатии), показателем которой является его октановое число. Интерес к оперативному измерению октанового числа, возникший с началом массового производства двигателей внутреннего сгорания, актуален по сей день и связан с постоянно растущими требованиями к качеству бензинового топлива, с одной стороны, и большим количеством предлагаемых на рынке марок бензина от разных производителей, с другой.

Традиционно для измерения октанового числа используют стационарную моторную установку, представляющую собой одноцилиндровый карбюраторный двигатель, применение которого в полевых условиях затруднено. Поэтому значительный интерес представляет разработка альтернативных, безмоторных методов определения детонационной стойкости, суть которых сводится к нахождению взаимной корреляции между октановым числом и каким-либо физико-химическим параметром топлива, который можно измерить оперативно.

Наиболее распространенный в настоящее время безмоторный метод определения октанового числа на практике основан на измерении диэлектрической проницаемости пробы бензина. При исследовании бензина, не содержащего антидетонационные присадки, действительно, наблюдается устойчивая корреляция между его дето-

национной стойкостью и диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  [1]. Применяемые при производстве такого бензина процессы каталитического риформинга и крекинга способствуют дополнительной изомеризации и ароматизации компонентов нефтяных фракций. При этом фактически происходит насыщение топлива разветвленными (изооктан, изопентан и др.) и ароматическими (бензол, толуол и др.) соединениями, детонационная стойкость и диэлектрическая проницаемость которых несколько выше, чем у остальных компонентов бензина (линейные алканы, циклоалканы и др.). В случае же применения в составе бензина антидетонационных присадок, наиболее перспективными из которых на сегодняшний день являются кислородосодержащие углеводородные соединения, корреляция между интересующими нас параметрами в общем случае исчезает. Это связано с тем, что такие бензиновые присадки (метилбутиловый эфир и др.) имеют намного большую величину диэлектрической проницаемости, чем традиционные высокооктановые компоненты автомобильного бензина ( $\epsilon = 2,27$  для бензола,  $\epsilon = 2,37$  для толуола,  $\epsilon = 27$  для этанола). То есть итоговая диэлектрическая проницаемость конкретной марки товарного бензина зависит от наличия/отсутствия в нем антидетонационных присадок, что при проведении экспрессного анализа топлива не всегда известно. Заметим, что на сегодняшний день в продаже имеется ряд диэлектрометрических октано-

метров (марок “Асмер”, “SHATOX SX-100M”, экспресс-анализатор “ИТ-5” и др.), но для их корректной работы необходима информация о происхождении и составе конкретной пробы бензина. В результате калибровка подобных приборов должна проводиться на бензине заранее известного производителя, что в свою очередь накладывает ограничения на универсальность описанной методики.

Диэлектрометрический способ определения октанового числа автомобильного бензина получил существенное развитие в работе [2]. Авторами предложен способ классификации марок товарного бензина путем анализа величины диэлектрической проницаемости исходного образца топлива и трех его фракций, получаемых при фракционной перегонке (первая фракция — от начала кипения до 75°C, вторая — от 75 до 120°C, третья — от 120 до 190°C). При этом, применяемая при обработке экспериментальных данных процедура статистического анализа (кластерный анализ) позволила с высокой точностью определять марку исследуемого образца товарного бензина. В то же время, оперативность предложенной методики невелика, поскольку процесс фракционной перегонки образцов бензина в полевых условиях связан с существенными временными и техническими ограничениями.

Целью данной работы было исследование возможности экспрессного определения октанового числа на основе анализа результатов измерений нескольких физико-химических параметров пробы бензина, каждый из которых в общем случае может не иметь явной корреляционной связи с искомой величиной. При этом должны учитываться критерии проведения экспрессного анализа — небольшое время измерений, простота и дешевизна используемого оборудования, минимальное количество манипуляций с исследуемой пробой топлива, возможность автоматизации.

К основным задачам работы относится выбор достаточно информативных анализируемых параметров бензина, отработка методики и оптимального протокола измерений. Необходимо также подобрать оптимальный метод статистической обработки данных, позволяющий осуществить классификацию образцов бензина по величине октанового числа.

### Выбор измеряемых физико-химических параметров

При выборе измеряемых физико-химических параметров бензиновой пробы целесообразно ориентироваться на те, что традиционно используются при разработке безмоторных способов определения октанового числа автомобильного бензина (табл. 1). Анализ физических методов, используемых для этой цели, приведен в [3]. Отметим, что применимость хроматографических и спектроскопических методов измерения весьма ограничена необходимостью использования сложного и дорогостоящего оборудования. Использование оптических методов ограничено достаточно высокими требованиями к условиям эксплуатации, характерным для всех оптических систем. Наибольшую популярность при проведении экспресс-анализа получили электрофизические методы. В этом случае, как правило, реализуется упомянутый диэлектрометрический способ определения октанового числа, а для измерений используется конденсаторная электрохимическая ячейка, заполненная исследуемым топливом. Такая ячейка легко монтируется в систему подачи топлива, неприхотлива к условиям эксплуатации, а измерение ее электрической емкости осуществляется при помощи простых электронных схем (метод вольтметра-амперметра, резонансный метод и т. д.).

Отмеченная выше неоднозначность в корреляции октанового числа бензина с его диэлектрической проницаемостью привела нас к необходимо-

Таблица 1

*Параметры, определяемые при применении основных безмоторных методов нахождения октанового числа бензина*

Методы	Определяемые параметры
Электромагнитные	Диэлектрическая проницаемость, индуктивность, добротность, тангенс угла диэлектрических потерь, проводимость
Оптические	Показатель преломления, оптическая плотность
Хроматографические	Октановое число смеси, которое рассчитывается по значениям концентрации отдельных химических веществ
Общефизические	Плотность, вязкость, коэффициент поверхностного натяжения, скорость и затухание ультразвуковой волны.
Спектроскопические	Поглощение в УФ- и ближней ИК-области на характеристической длине волны



сти анализа дополнительного параметра топлива — удельного электрического сопротивления. По его величине можно сделать заключение, в частности, о наличии и количестве в исследуемом бензине электропроводящих антидетонационных присадок, наиболее перспективной из которых на сегодняшний день является этиловый спирт. Как правило, измерение удельного сопротивления проводят на постоянном электрическом токе с использованием конденсаторной электрохимической ячейки [4].

Еще одной физической величиной, которую мы используем для проведения экспресс-анализа топлива, является его удельная плотность. Несмотря на то, что четкой корреляции между октановым числом и удельной плотностью также не наблюдается [3], тем не менее, ее значения для высокооктановых сортов бензина в целом больше, чем для низкооктановых [5]. Кроме того, удельная плотность является едва ли не единственной фундаментальной физической величиной в показателях качества автомобильного бензина, и для ее измерения уже давно разработаны экспрессные методики и приборы (вибрационный плотномер “D625”, плотномер 804). Использование этого параметра, как мы считаем, должно способствовать объективному анализу образцов топлив.

#### Особенности измерения электрофизических характеристик диэлектрических жидкостей

В соответствии с рекомендациями международной электротехнической комиссии (IEC) измерения электрофизических характеристик электроизоляционных жидкостей (в том числе и нефтяного топлива) с удельным сопротивлением  $10^{10} - 10^{16}$  Ом·см производятся по методикам, описанным в [6, 7]. Измерения в соответствии с методикой [6] предполагают определение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и удельного сопротивления  $\rho$  по результатам измерений электрической емкости  $C$  и сопротивления  $R$  заполненной исследуемой жидкостью конденсаторной электрохимической ячейки. Зная площадь электродов ячейки и расстояние между ними, можно легко рассчитать искомые значения  $\epsilon$ ,  $\rho$  и  $\text{tg}\delta$  ( $\text{tg}\delta = 1/(\epsilon\rho\omega)$ , где  $\omega$  — круговая частота). Недостатком данного способа является использование постоянного внешнего напряжения, которое подается на электроды электрохимической ячейки: наличие приэлектродных эффектов, которые происходят в этом случае на границе раздела «электрод — жидкость», существенно искажают результаты измерений удельного сопротивления исследуемого раствора (погрешность измерений может достигать 100%).

Измерения в [7] предполагают определение емкостного тока и тока проводимости путем прикладывания к исследуемому образцу переменного напряжения трапецеидальной формы. Емкостной ток  $I_c$  измеряют во время роста или спада напряжения, а ток проводимости  $I_r$  — при стабильном напряжении (на плоских участках трапецеидального сигнала). Если напряжение трапецеидального сигнала с амплитудой  $\pm V_s$  изменяется с известным наклоном  $dV/dt$ , то искомые емкость и сопротивление можно определить из соотношений  $C = \frac{I_c}{dV/dt}$ ,  $R = V_s/I_r$ .

Недостатком данного способа, как и предыдущего, является принципиальная невозможность полного исключения влияния поляризационных эффектов на результаты измерений, поскольку значение  $R$  определяется на интервалах, где внешнее напряжение постоянно, т. е. в квазистационарном режиме. При этом погрешность измерений, в частности величины  $R$ , по нашим данным, может составлять до 10–15%.

В данной работе точность измерений удельного сопротивления проб автомобильного бензина была увеличена благодаря применению доступной по своей реализации методики, исключая влияние поляризационных эффектов на процесс прохождения электрического тока через конденсаторную ячейку. В качестве тестирующего сигнала использован синусоидальный сигнал, для которого характерно отсутствие участков с постоянным напряжением. В этом случае через ячейку проходит ток, вектор которого можно разложить на активную и реактивную составляющие, поэтому для корректного определения значений  $R$  и  $C$  необходимо проводить измерение ее полного сопротивления (импеданса).

Эквивалентная схема конденсаторной электрохимической ячейки, заполненной исследуемой электроизоляционной жидкостью, состоит из параллельно соединенных сопротивления и емкости. В соответствии с такой схемой, для активной ( $R_e$ ) и реактивной ( $Im$ ) составляющих импеданса можно записать следующие выражения:

$$R_e = \frac{R}{4\pi^2 C^2 R^2 \nu^2 + 1}; \quad (1)$$

$$Im = \frac{2\pi C R^2 \nu}{4\pi^2 C^2 R^2 \nu^2 + 1}, \quad (2)$$

где  $\nu$  — частота измерений,  $\nu = \omega/(2\pi)$ .

Таким образом, измерив значения  $R_e$  и  $Im$ , из системы уравнений (1) и (2) можно определить значения  $R$  и  $C$  в данной эквивалентной схеме, а зная площадь электродов  $S$  и расстояние  $d$  между ними, найти искомые электрофи-



зические характеристики исследуемой жидкости по формулам

$$\varepsilon = \frac{d}{S} \frac{C}{\varepsilon_0}; \quad (3)$$

$$\rho = R \frac{S}{d}. \quad (4)$$

На практике для измерений полного электрического сопротивления используют стандартные лабораторные измерители импеданса, принцип работы которых основан, как правило, на мостовой схеме измерений. При этом нижняя граница определения тангенса угла диэлектрических потерь для таких приборов составляет  $10^{-3} - 10^{-4}$  при минимальной частоте измерений 25–50 Гц. При типовых значениях удельного сопротивления  $10^{12} - 10^{13}$  Ом·см и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon \approx 2$ , характерных для всех марок автомобильного бензина, значение тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{Re}/\text{Im}$ ) составляет 0,001–0,01. В этом случае при использовании стандартных лабораторных LCR-метров результат измерений активной составляющей импеданса конденсаторной ячейки в области нижних частот характеризуется значительной погрешностью (рис. 1). Этот недостаток стандартных LCR-измерителей обусловлен спецификой требований к измерению импеданса диэлектрического объекта, связанных с измерением сверхмалых токов.

На основании вышесказанного, измерения импеданса таких высокоомных объектов, как бензин, предлагается производить при более низких частотах — от 0,1 до 10 Гц. В этом случае активное сопротивление измеряется значительно точнее, т. к. оно не шунтируется емкостным сопротивлением, а значение тангенса угла потерь возрастает на два-три порядка (по сравнению с из-

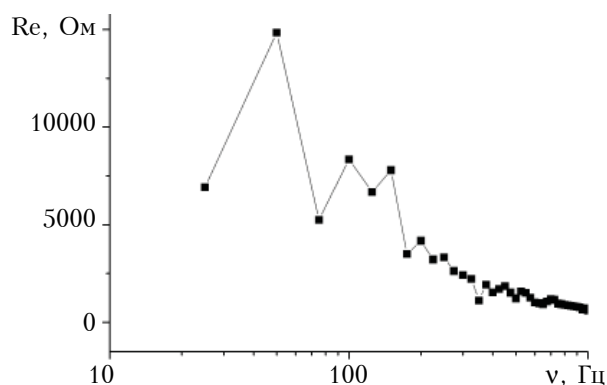


Рис. 1. Частотная зависимость активной составляющей импеданса образца бензина, полученная с использованием стандартного лабораторного измерителя импеданса E7-20

мерениями на частоте 50 Гц) и для автомобильного бензина составляет 0,1–1. Величины такого порядка удастся измерять достаточно точно (т. е. уверенно определять активную и реактивную составляющую импеданса) даже с использованием более простых, чем мостовые, измерительных схем, что, в свою очередь, значительно упрощает разработку и изготовление портативных измерительных экспресс-анализаторов.

### Экспериментальная часть

Измерения импеданса проводятся с помощью блок-схемы, показанной на рис. 2. Генератор подает на делитель напряжения (состоит из сопротивления нагрузки и конденсаторной ячейки, заполненной исследуемой бензиновой пробой) входное синусоидальное напряжение фиксированной частоты (из диапазона 0,1–10 Гц). Выходное напряжение снимается с измерительной ячейки. Входное и выходное напряжения синхронно оцифровываются двухканальным аналогово-цифровым преобразователем и поступают на вход устройства математической обработки, где определяются их амплитуды (соответственно,  $A$  и  $B$ ) и фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$  между ними.

Входное и выходное напряжения делителя связаны соотношением

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{Z + R_{\text{Н}}} Z, \quad (5)$$

где  $Z$  — импеданс ячейки;  
 $U_{\text{ВХ}}, U_{\text{ВЫХ}}$  — комплексные значения входного и выходного напряжения,  $U_{\text{ВХ}} = A \cdot \exp(j\omega t)$ ,  
 $U_{\text{ВЫХ}} = B \cdot \exp(j(\omega t + \Delta\varphi))$ .

Соответственно, для расчета импеданса получаем выражение

$$Z = \frac{R_{\text{Н}}}{\frac{A}{B} \exp(-j \cdot \Delta\varphi) - 1}. \quad (6)$$

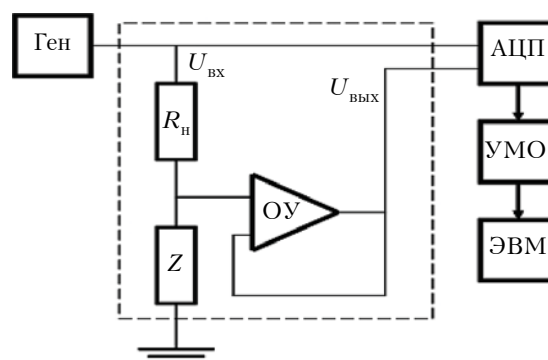


Рис. 2. Блок-схема портативного измерителя импеданса автомобильного бензина:

Ген — генератор;  $R_{\text{Н}}$  — сопротивление нагрузки;  $Z$  — конденсаторная ячейка; ОУ — операционный усилитель; АЦП — аналогово-цифровой преобразователь; УМО — устройство математической обработки

Входящие сюда величины  $A$ ,  $B$  и  $\Delta\phi$  определяются устройством математической обработки на фиксированной частоте измерений  $\epsilon$  из диапазона 0,1 – 10 Гц.

Таким образом, получив из (6) величину полного сопротивления, можно рассчитать его активную и реактивную составляющие, затем из системы уравнений (1) и (2) определить значения  $R$  и  $C$  и далее по формулам (3), (4) посчитать соответствующие им величины удельного сопротивления  $\rho$  и относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  исследуемой пробы.

Для исключения шунтирующего влияния входных каскадов АЦП на результаты измерений импеданса высокоомной конденсаторной ячейки оцифровка выходного напряжения делителя происходит с помощью повторителя напряжения, построенного на основе прецизионного операционного усилителя (см. рис. 2) со сверхнизким входным током (ОРА129). Важным является также экранирование измерительной схемы с целью уменьшения влияния на результаты измерений внешних электромагнитных помех.

На рис. 3 показан действующий макет портативного устройства для измерения электрофизических характеристик автомобильного бензина. В данной реализации измерительной схемы для оцифровывания входного и выходного напряжения делителя используется стандартная двухканальная осциллографическая приставка к компьютеру с вмонтированным в нее функциональным генератором (используется для формирования синусоидального тестового сигнала). Для подобных измерений также может использоваться разработанный нами ранее вариант портативного измерителя импеданса [8, 9] при внесении в его аналоговую измерительную часть изменений в соответствии с блок-схемой на рис. 2.



Рис. 3. Портативный измеритель импеданса автомобильного бензина, оснащенный специальной электролитической ячейкой

На рис. 4 представлены частотные зависимости составляющих импеданса ячейки для двух проб автомобильного бензина АИ92, полученные экспериментально и рассчитанные из выражений (1) и (2). Здесь видно, что эти данные практически совпадают, что свидетельствует об отсутствии влияния приэлектродных эффектов на процесс прохождения электрического тока через конденсаторную ячейку. В противном случае в эквивалентной схеме ячейки кроме элементов  $R$  и  $C$  присутствовали бы и другие компоненты (емкость двойного электрического слоя, сопротивление переносу, диффузионный импеданс), и точность расчетов была бы не столь высока.

Пробы для исследований (21 образец высокооктанового автомобильного бензина АИ92 и АИ95 девяти торговых марок) были приобретены на различных АЗС. Октановое число каждой пробы контролировалось в соответствии с ГОСТ 8226-82 «Топливо для двигателей. Исследовательский метод определения октанового числа» и в целом

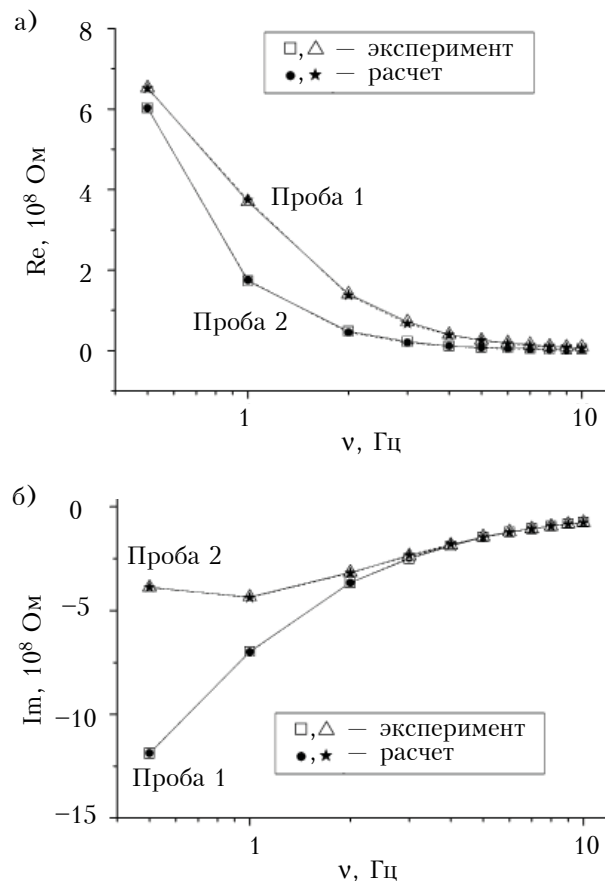


Рис. 4. Частотные зависимости активной (а) и реактивной (б) составляющих импеданса измерительной ячейки для двух проб автомобильного бензина АИ92:

проба 1 —  $\epsilon = 2,074$ ,  $\rho = 4,14 \cdot 10^{12}$  Ом·см;  
проба 2 —  $\epsilon = 2,048$ ,  $\rho = 1,007 \cdot 10^{12}$  Ом·см

Таблица 2

Значения параметров бензина различных марок и поставщиков

№ пробы	Марка бензина	Торговая марка	Удельное сопротивление, $10^{12}$ Ом·см	Диэлектрическая проницаемость	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
1	АИ95	ТНК	10,82	2,148	746
2			5,998	2,165	748
3		Shell	3,99	2,173	746
4		WOG	8,79	2,053	737
5			0,87	2,065	740
6		Mustang	0,68	2,061	735
7			0,53	2,022	745
8		ANP	2,67	2,247	747
9			7,29	2,181	738
10		Авиас	2,46	2,25	750
11		Okko	1,58	2,165	755
12		Socar	0,99	2,022	735
13			2,54	2,257	738
14	АИ92	ТНК	8,22	2,046	743
15		ANP	2,50	2,183	735
16		Socar	7,80	1,987	720
17		Авиас	1,63	2,14	743
18		Okko	4,14	2,074	745
19		BPCM	3,54	2,03	721
20			2,13	2,012	723
21		WOG	1,007	2,048	721

соответствовало заявленным производителем величинам. При помощи портативного измерителя (см. рис. 3) были определены электрофизические параметры ( $\rho$ ,  $\epsilon$ ) всех образцов топлива. Также ареометрическим способом (ГОСТ 3900-85 «Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности») была получена их плотность. Все измерения проводились в специальном термостате при температуре 20°C. Таким образом, каждая проба была охарактеризована тремя параметрами (удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость и плотность). Результаты этих измерений представлены в **табл. 2**.

#### Анализ полученных данных

Для анализа полученных многомерных данных были использованы математические методы статистического анализа, такие как кластерный анализ и метод анализа главных компонент, позволяющие провести распознавание образцов бензина с разными значениями октанового числа.

Статистическую процедуру кластеризации проводили методом  $k$ -средних [10, с. 38–40],

суть которого состоит в разделении  $m$  наблюдений на  $k$  кластеров при условии, что каждое наблюдение будет отнесено к тому кластеру, к центру которого оно находится ближе всего. В нашем случае изначально принималось  $k = m = 21$ , т. е. каждое наблюдение, относящееся к отдельному образцу, формировало единственный кластер. Далее происходило укрупнение кластеров, а критерием для каждого последующего этапа кластеризации была идентичность марок бензина по величине октанового числа [11]. Таким образом, 21 наблюдение из **табл. 2** было распределено на 11 неперекрывающихся кластеров, содержащих пробы бензина с одинаковым октановым числом (**табл. 3**). При дальнейшем уменьшении числа кластеров наблюдения из соседних групп начинали объединяться вследствие их взаимного сближения.

Достаточно большое число полученных единичных кластеров (шесть), скорее всего, объясняется большим разнообразием компонентного состава проб бензина [12] и, соответственно, значительным разбросом значений их параме-

Таблица 3

Кластеризация экспериментальных данных методом  $k$ -средних

№ кластера	Элементы кластера	Расстояние до центра кластера
1	WOG 95	0,098919
	Mustang 95	0,224353
	Mustang 95	0,413045
	Socar 95	0,247378
	WOG 95	0,159866
2	ANP 95	0,121654
	Авиас 95	0,291654
	Socar 95	0,408788
3	БPCM 92	0,268367
	БPCM 92	0,138120
	WOG 92	0,273787
4	Shell 95	0,212538
	ТНК 95	0,212538
5	ANP 92	0,283573
	Авиас 92	0,283573
6	ТНК 95	0
7	Okko 95	0
8	ANP 95	0
9	ТНК 92	0
10	Socar 92	0
11	Okko 92	0

тров, особенно удельного сопротивления. С другой стороны, наличие одиночных кластеров говорит об относительно малом числе наблюдений. При дальнейшем заполнении таблицы данными новых образцов число кластеров, очевидно, будет стремиться к некой оптимальной величине.

В нашем случае, однако, более наглядной оказалась классификация полученных данных методом анализа главных компонент [13]. Использование этого метода позволяет понизить размерность исходной трехмерной базы данных до двух главных компонент (ГК), и тогда каждое отдельное наблюдение представляется точкой на плоскости в прямоугольной системе координат ГК1 и ГК2.

На рис. 5 представлена проекция данных из табл. 2 на плоскость главных компонент (проценты на осях указывают «удельный информационный вес» каждой из координат). Здесь видно, что массив экспериментальных данных визу- ально формирует четыре области с одинаковыми значениями октанового числа (их границы обведе- ны), причем область из пяти компактно рас-

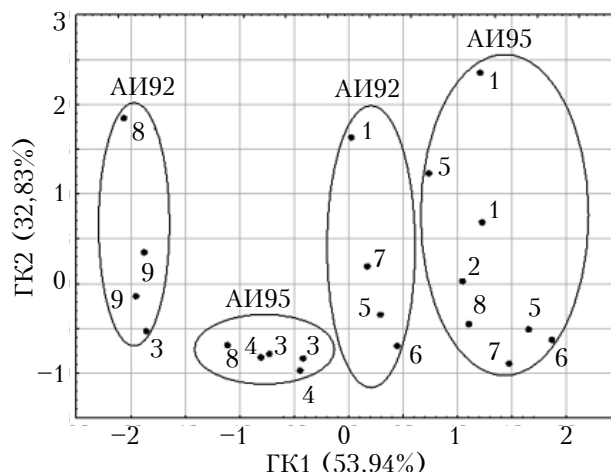


Рис. 5. Распределение на плоскости главных компонент исследуемых образцов бензина:

1 — ТНК; 2 — Shell; 3 — WOG; 4 — Mustang; 5 — ANP; 6 — Авиас; 7 — Okko; 8 — Socar; 9 — БPCM

положенных образцов бензина АИ95 (в нижней части диаграммы) имеет свое отображение и в предыдущей классификации методом кластеризации  $k$ -средних — это кластер №1 в табл. 3 (в свою очередь, образцы бензина, принадлежащие кластерам № 2, 3, 5, также компактно сгруппированы на плоскости ГК). Остальные выделенные на рис. 5 области (две области с бензином АИ92 и одна с АИ95) оказались «растянутыми» по плоскости вдоль второй главной компоненты ГК2. Фактически, это позволяет использовать для экспрессной оценки величины октанового числа проекцию наблюдений только на первую компоненту ГК1.

Как показали эксперименты, отмеченные на диаграмме рис. 5 области имеют достаточно четкие и повторяемые границы, что свидетельствует о потенциальной возможности экспрессной оценки октанового числа автомобильного бензина с помощью статистических методов анализа многомерных данных, получаемых из измерения физико-химических параметров исследуемых образцов топлива.

### Выводы

Предложенный способ определения электрофизических характеристик электроизоляционных жидкостей обеспечивает более точное, в сравнении с традиционными методами, измерение удельного сопротивления автомобильного бензина за счет исключения влияния на результаты измерений поляризационных эффектов, а также использования тестирующего сигнала более низкой частоты. Сконструированный макет портативного устройства простой конструкции позволяет измерять диэлектрическую проница-

емость и удельное сопротивление электроизоляционных жидкостей.

Анализ предложенного подхода к проведению классификации марок товарного автомобильного бензина с использованием статистических методов анализа многомерных данных, получаемых при измерении параметров бензина, показал, что в данном случае более предпочтительным является метод анализа главных компонент, а не кластерного анализа, что может быть обусловлено относительно небольшим числом исследуемых проб автомобильного бензина. С другой стороны, не совсем удачная попытка кластеризации полученного массива данных свидетельствует о необходимости его расширения за счет дополнительно измеряемых физико-химических параметров бензина, какими могут быть, например, кислотность, давление насыщенных паров и др.

Предложенные экспериментальный и методический подходы могут в дальнейшем послужить основой для разработки прототипов коммерческих приборов для экспрессного определения октанового числа автомобильного бензина.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Скворцов Б.В., Силов Е.А. Исследование корреляционных зависимостей между октановым числом и электродинамическими параметрами углеводородных продуктов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2009. — Т. 11, № 5. — С. 64–71.
2. Руднев В.А., Бойченко О.П., Карножицкий П.В. Класифікація товарних бензинів та легких газоконденсатних фракцій родовищ східних областей України на основі діелектрометричних та газохроматографічних даних // Методы и объекты химического анализа. — 2010. — Т. 5, № 3. — С. 148–157.
3. Подъячева К.И., Тузова В.В., Гарипов И.И., Дезорцев С.В. К определению октановых чисел нефтепродуктов // Башкирский химический журнал. — 2013. — Т. 20, № 2. — С. 99–102.
4. Пат. 2305283 России. Способ определения октанового числа бензинов / В.Н. Астапов. — 27.08.2007.
5. ГОСТ Р 51105-97. Топлива для двигателей внутреннего сгорания. Неэтилированный бензин, технические условия.
6. IEC 60247:2004. Insulating liquids - Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor ( $\tan \delta$ ) and d.c. resistivity.
7. IEC 61620:1998. Insulating liquids - Determination of the dielectric dissipation factor by measurement of the conductance and capacitance.
8. Кукла А.Л., Павлюченко А.С., Майстренко А.С., Мамыкин А.В. Импедансный анализатор для идентификации марок водно-спиртовых напитков // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2012. — № 1. — С. 15–21.
9. Кукла А.Л., Мамыкин А.В., Майстренко А.С., Павлюченко А.С. Экспресс анализатор параметров функциональных материалов на основе метода импедансной спектроскопии // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. — 2012. — Т. 3 (9), № 3. — С. 6–15.
10. Миркин Б.Г. Методы кластер-анализа для поддержки принятия решений: обзор. — Москва: Изд. дом Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики", 2011.
11. Мамикін А.В., Кукла О.Л., Майстренко А.С., Павлюченко О.С., Мацас Є.П. Застосування методу імпедансної спектроскопії для визначення електрофізичних характеристик діелектричних рідин // Тр. 18-ї МНПК «СІЕТ-2017». — Україна, м. Одеса. — 2017. — С. 97–98.
12. Кукла А.Л., Мамыкин А.В., Майстренко А.С., Полункин Е.В., Старжинская Л.И. Использование метода импедансной спектроскопии для анализа бензанолевого топлива // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2015. — № 2-3. — С. 61–67. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.2-3.61>
13. Jurs P.C., Bakken G.A. and McClelland H.E. Computational Methods for the Analysis of Chemical Sensor Array Data from Volatile Analytes // Chemical Review. — 2000. — Vol. 100. — P. 2649–2678.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 26.07 2017 г.

А. В. МАМИКІН, О. Л. КУКЛА, А. С. МАЙСТРЕНКО, Є. П. МАЦАС, Л. М. МАТВІЄНКО

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України

E-mail: kukla@isp.kiev.ua

## СПОСІБ ЕКСПРЕС-ОЦІНКИ ОКТАНОВОГО ЧИСЛА БЕНЗИНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОРТАТИВНОГО СПЕКТРОІМПЕДАНСНОГО ВИМІРЮВАЧА І МЕТОДІВ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ

*Запропоновано спосіб визначення електрофізичних характеристик електроізоляційних рідин на прикладі бензину різних марок, заснований на спектроімпедансних вимірах конденсаторної електрохімічної комірки, заповненої досліджуваною рідиною, при прикладанні синусоїдальної тестової напруги в області частот 0,1–10 Гц, що забезпечує більш точні вимірювання в порівнянні з відомими традиційними методами. Розроблений та сконструйований портативний вимірник повного електричного опору (імпедансу) діелектричних рідин. Запропонований і протестований підхід до експресної оцінки октанового числа автомобільного бензину за допомогою спектроімпедансних вимірювань та використання статистичних методів аналізу багатовимірних даних.*

*Ключові слова:* імпедансна спектроскопія, автомобільний бензин, питомий опір, діелектрична проникність, статистичний аналіз.



DOI: 10.15222/TKEA2017.4-5.52  
UDC 532. 538; 539. 21; 621. 38

A. V. MAMYKIN, A. L. KUKLA, A. S. MAISTRENKO,  
E. P. MATZAS, L. M. MATVIENKO

Ukraine, Kiev, V. E. Lashkaryov Institute of semiconductor physics of NAS of Ukraine  
E-mail: kukla@isp.kiev.ua

## A METHOD FOR EXPRESS ESTIMATION OF THE OCTANE NUMBER OF GASOLINE USING A PORTABLE SPECTROIMPEDANCE METER AND STATISTICAL ANALYSIS METHODS

*The authors propose a method for determination of the electro-physical characteristics of electrical insulating liquids on the example of different types of gasoline. The method is based on the spectral impedance measurements of a capacitor electrochemical cell filled with the liquid under study. The application of sinusoidal test voltage in the frequency range of 0,1–10 Hz provides more accurate measurements in comparison with known traditional methods. A portable device for measuring total electrical resistance (impedance) of dielectric liquids was designed and constructed. An approach for express estimation of octane number of automobile gasoline using spectroimpedance measurements and statistical multi variation methods of data analysis has been proposed and tested.*

**Keywords:** impedance spectroscopy, automobile gasoline, resistivity, dielectric constant, statistical analysis.

### REFERENCES

1. Skvortsov B.V., Silov E.A. [Investigation of correlation dependencies between the octane number and electrodynamic parameters of hydrocarbon products]. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2009, vol. 11, no. 5, pp. 64-71. (Rus)
2. Rudnyev V.A., Boichenko O.P., Karnozhits'kii P.V. [Classification of commercial gasoline and light gas condensate fractions of fields of Ukraine eastern regions on the basis of dielectrometric and gas chromatographic data]. *Methods and Objects of Chemical Analysis*, 2010, vol. 5, no. 3, pp. 148-157. (Rus)
3. Pod'yacheva K.I., Tuzova V.V., Garipov I.I., Dezortsev S.V. [To the octane number determination of petroleum products]. *Bashkirskii Khimicheskii Zhurnal*, 2013, vol. 20, no. 2, pp. 99-102. (Rus)
4. Astapov V.N. [Method for determination of the octane number of gasolines] Pat. RF, no. 2305283, 2007.
5. GOST P 51105-97. *Topliva dlya dvigatelei vnutrennego sgoraniya. Neetilirovannyi benzin, tekhnicheskie usloviya* [State standard P 51105-97. Fuels for internal combustion engines. Lead-free gasoline, specifications. Moscow, 1997]
6. IEC 60247:2004. Insulating liquids - Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor (tan d) and d.c. resistivity.
7. IEC 61620:1998. Insulating liquids - Determination of the dielectric dissipation factor by measurement of the conductance and capacitance.
8. Kukla A.L., Pavlyuchenko A.S., Maistrenko A.S., Mamykin A.V. [Impedance analyzer for trademarks of aqueous-alcoholic drinks identification]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2012, no 1, pp. 15–21. (Rus)
9. Kukla A.L., Mamykin A.V., Maistrenko A.S., Pavluchenko A.S. [Express analyzer of functional materials parameters based on the impedance spectroscopy method]. *Sensor Electronics and Microsystems Technologies*, 2012, vol. 3 (9), no. 3, pp. 6-15 (Rus)
10. Mirkin B.G. [Cluster analysis methods for decision support: A Review]. Moscow, Izd. dom Natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta "Vysshaya shkola ekonomiki", 2011. (Rus)
11. Mamykin A.V., Kukla O.L., Maistrenko A.S., Pavluchenko A.S., Matzas E.P. [Using of the impedance spectroscopy method for determination of electrophysical characteristics of dielectric liquids]. *Proc. of the 18<sup>th</sup> Int. scientific-pract. conf. "Modern information and electronic technologies"*, Ukraine, Odessa, 2017, pp. 97-98 (Rus)
12. Kukla A.L., Mamykin A.V., Maistrenko A.S., Polunkin E.V., Starzhinska L.I. [Application of impedance spectroscopy method for analysis of benzanol fuels]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2015, no 2–3, pp. 61-67(Rus) <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.2-3.61>
13. Jurs P.C., Bakken G.A. and McClelland H.E. *Computational Methods for the Analysis of Chemical Sensor Array Data from Volatile Analytes*. Chemical Review, 2000, vol. 100, pp. 2649–2678.

Д. т. н. М. М. ВАКІВ, І. М. СИВОРОТКА, А. М. БУЛАТ

Україна, м. Львів, Науково-виробниче підприємство «Електрон-Карат» — дочірнє підприємство  
Приватного акціонерного товариства «Концерн-Електрон»  
E-mail: office@carat.electron.ua

## НВП «ЕЛЕКТРОН-КАРАТ» — 45 РОКІВ УСПІХУ

*Статтю присвячено Науково-виробничому підприємству «Електрон-Карат» — від моменту створення до сьогоднішніх днів. Описано визначні етапи його розвитку та науково-технічні результати, досягнуті колективом протягом 45-річної історії підприємства.*

*Ключевые слова: функціональна електроніка, опти- та акустoeлектроніка; монокристали складних оксидів, епітаксійні плівки рідкісноземельних сполук; МОС-гібридна епітаксія; нанорозмірні напівпровідникові гетероструктури.*

22 листопада 2017 року виповнюється 45 років від дня заснування Науково-виробничого підприємства, яке нині іменується «Електрон-Карат». Сьогодні НВП «Електрон-Карат» — провідна промислова науково-технологічна організація України з розробки та виробництва матеріалів для електронної техніки.

А історія цього підприємства — це наочне відображення розвитку радіoeлектронного матеріалознавства в Україні. Розпочалась вона в 1972 році із заснування Львівського науково-дослідного інституту матеріалів (ЛНДІМ) Міністерства радіопромисловості СРСР. Перед новоствореним інститутом було поставлено завдання стати головною організацією міністерства в галузі розробки та впровадження у виробництво новітніх матеріалів радіoeлектроніки.

Одним з головних завдань у перші роки після створення ЛНДІМ було розроблення технологій одержання матеріалів для оптичного запису інформації та пристроїв на їх основі. В межах цього напрямку були розроблені технології отримання плівок халькогенідних склоподібних напівпровідників і матеріалів для запису інформації на основі органічних фототермопластиків для багатократних циклів запису і стирання голограм.

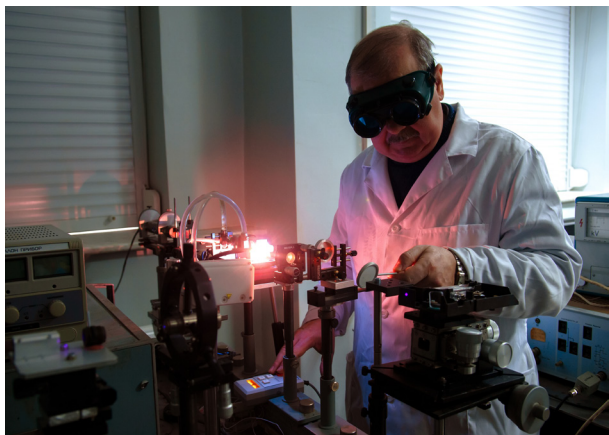
Крім того, практично з перших місяців існування у ЛНДІМ було організовано науково-технологічний напрямок з розроблення матеріалів для радіомонтажних робіт (клеїв, лаків, фарб, флюсів тощо). Важливим напрямком також була розробка технологій одержання тонкоплівкових та товстоплівкових матеріалів (паст) для створення радіoeлектронних компонентів нового покоління. Розроблялися та серійно ви-

пускались мішені для вакуумного напилювання тонких плівок та спеціальні сплави на основі алюмінію для корпусування радіoeлектронних компонентів, матеріали функціональної кераміки для монтажних робіт та ін.

Підприємство матеріалознавчого профілю у 70–80-ті роки минулого століття не могло обійти проблему розробки технологій напівпровідників. Наприкінці 1970-х років в інституті почав розвиватися напрямок технологій одержання монокристалічних складних оксидів для функціональної електроніки — вирощування монокристалів складних оксидів за методом Чохральського та вирощування тонких кристалічних шарів з розчину у розплаві методом епітаксії на монокристалічні підкладки.

З моменту створення підприємство на своєму шляху пройшло кілька визначальних етапів. Якщо на другу половину 80-х років минулого століття припав пік розвитку НВО «Карат» з точки зору кількості розроблюваних матеріалів та наукових досягнень, то завдяки тому, що у





1990 році, напередодні набуття Україною незалежності, НВО «Карат» увійшло до складу концерну «Електрон» (згодом, з 1991 року — одного з перших акціонерних товариств СРСР), підприємство у кризові роки не тільки зберегло базові технології, але й добилося помітних успіхів у розвитку прикладних наукових досліджень, оновленні та зміцненні науково-технологічної бази, що згодом дозволило організувати випуск низки інноваційних матеріалів і виробів.

У 2004 році унікальний комплекс з вирощування та досліджування монокристалічних матеріалів складних оксидів, створений на нинішньому НВП «Електрон-Карат» і який не має аналогів на теренах колишнього СРСР, визнано науковим об'єктом, що становить національне надбання України. Основу комплексу складають установки для вирощування об'ємних монокристалів сполук складних оксидів в контрольованій атмосфері та установки рідинно-фазної епітаксії рідкісноземельних оксидних сполук, що забезпечують отримання бездефектних плівок на підкладках діаметром до 100 мм і товщиною монокристалічного шару до 700 мкм. Комплекс забезпечує можливість проведення в Україні фундаментальних досліджень та прикладних розробок по створенню технологічних процесів одержання нових монокристалічних матеріалів світового рівня. Багаторічний досвід та сучасна технологічна і дослідницька оснащеність лабораторій з вирощування монокристалів дозволили не тільки розробити технології вирощування крупногабаритних монокристалів ніобату літію, вольфрамітів свинцю, кальцію та кадмію, молібдату кальцію, чистого та легovanого гадоліній-галієвого гранату, ітрій-алюмінієвого перовскиту, галату неодиму та ін., а й розробити технології та налагодити виготовлення з них різноманітних виробів, що застосовуються в наукових дослідженнях, медичній рентгенівській томографії та інших спеціалізованих дозиметричних приладах

контролю оточуючого середовища, а також чисельних пристроях квантової і оптоелектроніки (твердотільні лазери, пристрої керування лазерним променем та ін.).

Визнанням досягнень у технологіях вирощування кристалів складних оксидів стала участь НВП «Електрон-Карат» у грандіозному міжнародному проекті зі створення Великого адронного колайдера Європейської організації з ядерних досліджень (CERN) в частині виготовлення високоефективних монокристалічних детекторів високоенергетичного випромінювання.

Наступним, надзвичайно важливим етапом розвитку НВП стало виконання у 2007 — 2010 роках низки інноваційних проектів за рахунок внутрішніх інвестицій ПрАТ «Концерн-Електрон». Без сумніву, це було унікальне для України рішення, коли вельми значні кошти недержавного акціонерного товариства не були залучені у швидкий оборот, а були вкладені у довгострокову й ризиковану перспективу. Цей капітал акціонерів концерну був використаний для переоснащення технологічної бази підприємства сучасним закордонним обладнанням і доведення її до найсучаснішого високотехнологічного рівня.

Інвестиції сприяли розробці низки технологій вирощування та прецизійної обробки оксидних монокристалів для оптоелектроніки та створення пристроїв на їхній основі, отриманню матеріалів і створенню зразків низки сучасних пристроїв оптоелектроніки та акустoeлектроніки.

Завдяки інноваційним коштам ПрАТ «Концерн-Електрон» та придбаному ЗАТ «НВК «Наука» спеціальному технологічному обладнанню була створена єдина в Україні високотехнологічна промислова дільниця МОС-гідридної епітаксії. На цій дільниці організовано виробництво сучасних нанорозмірних епітаксійних структур для над'яскравих світлодіодів, фотоелектричних тандемних фотоперетворювачів з коефіцієнтом корисної дії на рівні 35—40%, лазерних структур тощо. Потенційні можливості дільниці дозволя-







ють без значних матеріальних витрат розробляти технології одержання і впроваджувати в серійне виробництво епітаксійні структури для «білих» світлодіодів, що забезпечують створення вітчизняних енергозберігаючих джерел світла.

Наявність в НВП «Електрон-Карат» унікального технологічного та контрольно-вимірювального обладнання дозволили розпочати у 2015 році низку робіт у рамках цільової науково-технічної програми НАН України «Дослідження і розробки з проблем підвищення обороноздатності і безпеки держави».

Визнанням наукової і технологічної вагомості досягнень підприємства стали договори про науково-технічне співробітництво та комерційні контракти з науковими установами і виробни-

ми компаніями Словаччини, Індії, Китаю, США, Німеччини, Франції, Кореї, Польщі, Болгарії, Швейцарії та інших країн.

Та не тільки прикладною наукою і виробництвом відомий «Електрон-Карат». На підприємстві функціонують науково-фундаментальні школи, які визнані далеко за межами України. Тут успішно функціонує філія кафедри напівпровідникової електроніки Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету «Львівська політехніка». За роки роботи кафедри виховано кілька сотень спеціалістів, значна частина яких пов'язала свою долю з «Електрон-Карат». Завдяки плідній співпраці з Національним університетом виросли і наукові кадри підприємства — сьогодні на НВП «Електрон-Карат» працює чотири доктори та сім кандидатів наук.

Свої 45 років НВП «Електрон-Карат» зустрічає як визнаний лідер у вітчизняній галузі технологій і матеріалів для електроніки. Завдяки колективу науковців та спеціалістів підприємства, заслуженим ветеранам, талановитій та працьовитій молоді, можна бути впевненими у тому, що НВП «Електрон-Карат» і надалі зберігатиме і посилюватиме свої позиції у галузі розробки та виробництва матеріалів для електронної техніки.

Дата надходження рукопису  
до редакції 11.10 2017 г.

Д. т. н. Н. М. ВАКИВ, И. М. СЫВОРОТКА, А. М. БУЛАТ

Украина, г. Львов, Научно-производственное предприятие «Электрон-Карат» —  
дочернее предприятие Частного акционерного общества «Концерн-Электрон»  
E-mail: office@carat.electron.ua

## НПП «ЭЛЕКТРОН-КАРАТ» — 45 ЛЕТ УСПЕХА

Статья посвящена Научно-производственному предприятию «Электрон-Карат» — от момента создания до сегодняшних дней. Описаны выдающиеся этапы его развития и научно-технические результаты, достигнутые коллективом в течение 45-летней истории предприятия.

Ключевые слова: функциональная электроника, опто- и акустоэлектроника; монокристаллы сложных оксидов, эпитаксиальные пленки редкоземельных соединений; МОС-гидридная эпитаксия; наноразмерные полупроводниковые гетероструктуры.

DOI: 10.15222/TKEA2017.4-5.61  
UDC 001+621.372

М. М. VAKIV, I. M. SYVOROTKA, A. M. BULAT

Ukraine, Lviv, Scientific Research Company «Electron-Carat»  
E-mail: office@carat.electron.ua

## SRC «ELECTRON-KARAT» — 45 YEARS OF SUCCESS

The paper is devoted to the Scientific-Production Company «Electron-Karat», its history from the moment of creation to the present day. Described are the significant stages of the company's development and the scientific and technical results achieved by its team during 45 years.

Keywords: functional electronics, opto- and acousto-electronics; complex crystals of complex oxides, epitaxial films of rare-earth compounds; MOS-hydride epitaxy; nanosized semiconductor heterostructure.



## РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

*Лузин Сергей Юрьевич*, докт. техн. наук, технический директор ООО «Эремекс», г. Санкт-Петербург

*Николаенко Юрий Егорович*, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

*Примирский Владислав Филиппович*, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник, ООО «Автоэкоприбор», г. Киев

*Рыбка Александр Викторович*, канд. физ.-мат. наук, Национальный научный центр Харьковского физико-технического института

*Сафронов Павел Сергеевич*, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет

*Сидорец Владимир Николаевич*, докт. техн. наук, ведущий научный эксперт, Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding), г. Гуанчжоу

*Томашик Василий Николаевич*, докт. хим. наук, ученый секретарь, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев

*Тыныныка Александр Николаевич*, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет

*Фаст Владимир Николаевич*, канд. техн. наук, доцент, Национальный университет «Львовская политехника»

---

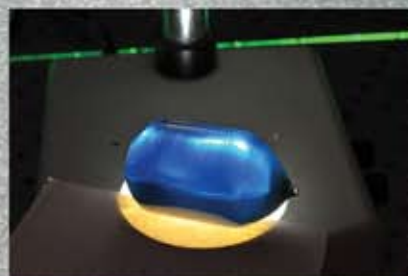
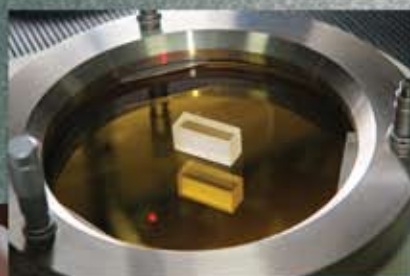
1. К рассмотрению принимаются статьи прикладной направленности на русском, украинском или английском языке, которые не были опубликованы ранее и не переданы для публикации в другие издания.
  2. В журнале публикуются научно-практические и экспериментальные работы по тематическим направлениям, с которыми можно ознакомиться на сайте журнала.
  3. Все поступающие к рассмотрению материалы проходят двухстороннее закрытое рецензирование.
  4. При обнаружении плагиата или фальсификации результатов статья отклоняется.
  5. Редакция не взимает плату за опубликование рукописи и не выплачивает авторский гонорар.
  6. Обязательным условием для принятия статьи к печати является ее соответствие общепринятым нормам построения научной публикации (подробнее см. на сайте журнала).
  7. Статья должна быть четко структурирована, а поставленная задача, выводы и название — согласованы между собой.
  8. При написании статьи следует обратить внимание на следующее:
    - название рукописи должно быть конкретным, информативным и в то же время по возможности кратким;
    - аннотация должна быть достаточно лаконичной (от 50 до 100 слов) и в то же время информативной, соответствовать содержанию статьи и показывать, что сделано в работе;
    - ключевые слова должны быть подобраны так, чтобы вероятность нахождения статьи через поисковые системы была как можно выше;
    - описание результатов, представленных на рисунках, должно включать в себя интерпретацию этой информации, а не сводиться к дублированию подрисовочных подписей или к простому описанию приведенных зависимостей. Например, вместо таких неинформативных фраз, как «На рис. 1 приведен график зависимости  $A$  от  $B$ . Из рисунка видно, что при возрастании  $B$  значение  $A$  монотонно уменьшается.», следует дать пояснение типа «Как видно из рис. 1, при возрастании  $B$  значение  $A$  монотонно уменьшается, что свидетельствует о том, что ...»;
    - выводы (заключение) не должны повторять аннотацию — в них нужно привести результаты работы (а не краткое содержание статьи). Правильно сформулировать выводы помогут такие фразы, как «Проведенное исследование показало, что ...», «Разработанная методика позволяет ...», «Авторами установлено, что...» и др.
  9. Список «Использованные источники» (образец см. на сайте) формируется в порядке их упоминания в тексте.
  10. Тематическую информацию (название, ФИО авторов, место работы, аннотацию и ключевые слова) для русскоязычной статьи нужно привести на украинском (по возможности) и английском языках в конце статьи. При этом англоязычная аннотация должна быть представлена в расширенном виде (до 250 слов) и отражать все структурные элементы статьи (актуальность темы, постановку задачи, описание решения, выводы и практическую значимость).
  - Для статей на английском языке приводится краткая аннотация (50–100 слов), а также перевод тематической информации на русский и украинский (по возможности).
  11. Редакция не предъявляет жестких требований к объему статьи — главное, чтобы он был оправдан.
  12. При наборе текста статьи использование программ типа MathType допускается только в тех случаях, когда Word бессилен, например при наборе специальных знаков над буквенными обозначениями, подкоренных выражений, пределов интегрирования, суммирования и т. п.
  13. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а терминология соответствовать общепринятой. Все использованные символы и аббревиатуры нужно пояснить при первом их упоминании в тексте.
  14. С точки зрения удобства верстки желательно, чтобы объем иллюстраций не превышал 40% от общего объема статьи.
  15. В начале статьи, кроме ее названия и информации об авторах (ФИО, ученые степени, место работы, e-mail), необходимо указать ее индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК).
  16. Материалы статьи направляются по e-mail <tkea@optima.com.ua>. В тексте письма нужно указать ФИО авторов, название статьи и соответствующее тематическое направление (см. п. 2), а к письму прикрепить подписанные Авторское соглашение и Карточки автора (см. на сайте).
  17. При цитировании статей из журнала «ТКЭА» его название на латинице должно быть представлено транслитерацией, а именно: «Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature».
- P.S. Для контроля выполнения требований к содержанию статьи авторы могут воспользоваться критериями, по которым рукопись будет оцениваться рецензентом (см. бланк рецензии на сайте).





**ЭЛЕКТРОН  
КАРАТ**

К статье  
«НВП "Электрон-Карат" — 45 років»



*Номер готовили  
Гуанчжоу, Киев, Львов, Одесса,  
Санкт-Петербург, Харьков*



Пишите  
Подписывайтесь  
Читайте