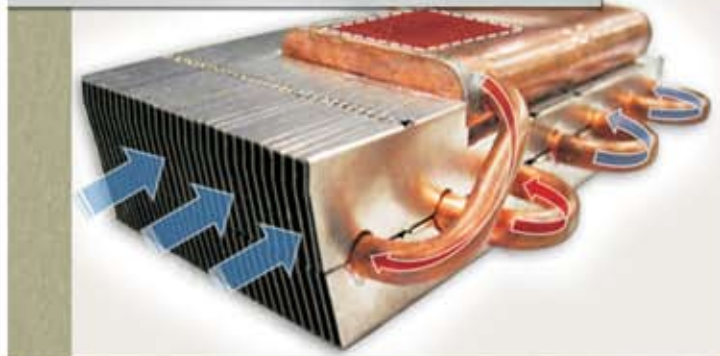


ТРА

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

К статье
«Применение тепловых труб
в системах обеспечения
тепловых режимов РЭА:
современное состояние и
перспективы»



2—3 2015

МАРТ — ИЮНЬ



E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua
Login Skype: politechperiodika, тел. +38 (048)728-18-50, 728-49-46

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

ISSN 2225-5818

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

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

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

Включен в базы данных Ulrich's Periodicals Directory, CrossRef, DOAJ и наукометрическую базу РИНЦ

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

В Украине Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.
Подписное агентство «Идея», www.idea.com.ua. Индекс 11146.
В России Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.
В Белоруссии Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 23785.
В редакции «ТКЭА» можно подписаться с любого номера.



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

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

E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua,
тел. +38 (048)728-18-50,
тел./факс 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.

Подписано к печати 24.06 2015. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.
Печ. л. 8,5+1,0. Уч.-изд. л. 10,5. Тираж 200 экз. Заказ № 98.
Издательство «Политехперіодика»
(65044, г. Одесса-44, а/я 17).
Отпечатано в типографии РА «ART-V»
(65026, г. Одесса, ул. Гаванная, 3).

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2015 № 2–3

Год издания 39-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)

К.т.н. А. А. Дашковский (г. Киев)

Д.т.н. Г. А. Оборский (г. Одесса)

Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. С. Г. 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,

зам. главного редактора (г. Киев)

Д.ф.-м.н. В. В. Должиков (г. Харьков)

К.т.н. И. Н. Еримичой (г. Одесса)

Д.т.н. А. А. Ефименко,

зам. главного редактора (г. Одесса)

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)

К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)

Д.т.н. И. Ш. Невлюдов (г. Харьков)

Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)

К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)

К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)

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

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

МПП Украины

Институт физики полупроводников

им. В. Е. Лашкарёва

Научно-производственное

предприятие «Сатурн»

Одесский национальный

политехнический университет

Издательство «Политехперіодика»

Одобрено к печати

Ученым советом ОНПУ

(Протокол № 8 от 23.06 2015 г.)

Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

СОДЕРЖАНИЕ

Электронные средства: исследования, разработки

Пассивные ограничители иммитанса. *Н. А. Филинук, Л. Б.*

Лищинская, Р. Ю. Чехместрук

3

Оптимизация расположения межслойных переходов на

группе проводников. *К. А. Кноп, С. Ю. Лузин*

10

СВЧ-техника

Алгоритм синтеза линейных антенных решеток с требуе-

мой диаграммой направленности и целочисленными ам-

плитудными коэффициентами. *А. В. Садченко, О. А.*

Кушиниренко, А. В. Троянский

15

Обеспечение тепловых режимов

Применение тепловых труб в системах обеспечения теп-

ловых режимов РЭА: современное состояние и перспек-

тивы. *С. М. Хайрнатов*

19

Влияние эффективности исходных материалов на показате-

ли надежности термоэлектрических охлаждающих устройств.

Часть 2: Двухкаскадные ТЭУ. *В. П. Зайков, В. И.*

Мещеряков, Ю. И. Журавлев

34

Сенсоэлектроника

Оперативный контроль состояния акустических сенсорных

сетей. *В. А. Болтенков, Г. Х. М. Аль-Джасри*

39

Материалы электроники

Структура полимерных композитов на основе диоксида

ванадия и их диэлектрические свойства в диапазоне радио-

частот. *В. Р. Колбунов, А. С. Тонкошкур, Е. В. Антонова*

47

Метрология. Стандартизация

Проблемы при измерениях интегральной чувствительности

фотоприемников и некоторые пути их решения. *И. В.*

Докторович, В. Н. Годованюк, В. Г. Юрьев, В. Г.

Житарюк

53

Использование метода импедансной спектроскопии для

анализа бензанолевого топлива. *А. Л. Кукла, А. В. Мамыкин,*

А. С. Майстренко, Е. В. Полункин, Л. И. Старжинская

61

Список рецензентов номера

67

Памятка автору журнала «ТКЭА»

68

Новые книги

14, 18, 46

ЗМІСТ

Електронні засоби: дослідження, розробки

Пасивні обмежувачі імітансу. *Н. А. Філінуєк, Л. Б. Ліщинська, Р. Ю. Чехмєструк* (3)

Оптимізація розташування міжшарових переходів на групі провідників. *К. А. Кноп, С. Ю. Лузін* (10)

СВЧ-техніка

Алгоритм синтезу лінійних антенних решіток з необхідною діаграмою спрямованості і цілочисловими амплітудними коефіцієнтами. *А. В. Садченко, О. А. Кушніренко, О. В. Троянський* (15)

Забезпечення теплових режимів

Застосування теплових труб в системах забезпечення теплових режимів РЕА: сучасний стан та перспективи. *С. М. Хайрмасов* (19)

Вплив ефективності первинних матеріалів на показники надійності термоелектричних охолоджуючих пристроїв. Частина 2: Двокаскадні ТЕП. *В. П. Зайков, В. І. Мещеряков, Ю. І. Журавльов* (34)

Сенсоелектроніка

Оперативний контроль стану акустичних сенсорних мереж. *В. О. Болтєнков, Г. Х. М. Аль-Джасрі* (39)

Матеріали електроніки

Структура полімерних композитів на основі діоксиду ванадію та їх діелектрична проникність в діапазоні радіочастот. *В. Р. Колбунів, О. С. Тонкошкур, Є. В. Антонова* (47)

Метрологія. Стандартизація

Проблеми при вимірюванні інтегральної чутливості фотоприймачів та деякі шляхи їх вирішення. *І. В. Докторович, В. М. Годованюк, В. Г. Юр'єв, В. Г. Житарюк* (53)

Використання методу імпедансної спектроскопії для аналізу бензанольного палива. *О. Л. Кукла, А. В. Мамикін, А. С. Майстрєнко, Є. В. Полункін, Л. І. Старжинська* (61)

CONTENTS

Electronic devices: research, development

Passive imittance limiters. *N. A. Filinyuk, L. B. Lischinskaya, R. Yu. Chekhmestruk* (3)

Via placement optimization for a group of wires. *K. A. Knop, S. Yu. Luzin* (10)

Microwave engineering

Algorithm for the synthesis of linear antenna arrays with desired radiation pattern and integral amplitude coefficients. *A. V. Sadchenko, O. A. Kushnirenko, A. V. Troyansky* (15)

Thermal management

The use of heat pipes in thermal control system for electronics: current situation and prospects. *S. M. Khairnasov* (19)

Influence of the effectiveness of raw materials on the reliability of thermoelectric cooling devices. Part 2: Two-stage thermoelectric devices. *V. P. Zaykov, V. I. Meshcheryakov, Yu. I. Zhuravlev* (34)

Sensors

Operational monitoring of acoustic sensor networks. *V. A. Boltenkov, G. Kh. M. Al-Jasri* (39)

Materials of electronics

Structure and dielectric properties in the radio frequency range of polymer composites based on vanadium dioxide. *V. R. Kolbunov, A. S. Tonkoshkur, K. V. Antonova* (47)

Metrology. Standardization

Problems in measurement of integrated sensitivity of photodetectors. *I. V. Doktorovich, V. N. Hodovaniouk, V. G. Yuryev, V. G. Zhytaryuk* (53)

Application of impedance spectroscopy method for analysis of benzanol fuels. *A. L. Kukla, A. V. Mamykin, A. S. Maistrenko, E. V. Polunkin, L. I. Starzhinska* (61)

Д. т. н. Н. А. ФИЛИНЮК, д. т. н. Л. Б. ЛИЩИНСКАЯ, Р. Ю. ЧЕХМЕСТРУК

Украина, Винницкий национальный технический университет
E-mail: chehroma@yandex.ru

ПАССИВНЫЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ ИММИТАНСА

Предложены R-, L-, C-ограничители иммитанса в виде четырехполюсника, выходной иммитанс которого до определенного значения зависит от величины входного. Приведена классификация ограничителей иммитанса. Обоснованы основные параметры. Разработаны пассивные R-, L-, C-ограничители с возможностью ограничения иммитанса сверху и снизу. Проведена оценка влияния входных паразитных составляющих иммитанса на передаточную характеристику ограничителей.

Ключевые слова: ограничитель иммитанса, передаточная характеристика, уровень ограничения.

Существует ряд электронных схем, предназначенных для ограничения тока [1–3] и напряжения [4–6]. При разработке некоторых электронных устройств, например иммитансных логических схем [7], согласующих [8] и компенсирующих [9] цепей, возникает необходимость ограничения их сопротивления. При работе на переменном токе в качестве характеристик электрической цепи кроме активной составляющей сопротивления используются также реактивные — емкостная и индуктивная, поэтому в ряде случаев возникает задача ограничения этих величин. В известных авторам литературных источниках отсутствуют сведения о параметрах и схемотехнической реализации устройств, выполняющих такую функцию ограничения, что определяет актуальность рассматриваемых в работе вопросов.

В настоящей статье представлены результаты разработки основ построения пассивных ограничителей активного (R), емкостного (X_C) и индуктивного (X_L) сопротивления.

Определение и классификация ограничителей иммитанса

Электрическую цепь характеризует полное сопротивление (импеданс) или полная проводимость (адмитанс), и когда не указывается их конкретное значение, используется обобщающее понятие «иммитанс», которое не связано с единицами измерения [10, 11].

Ограничителем иммитанса назовем четырехполюсник (рис. 1), выходной иммитанс которого $W_{\text{ВЫХ}}$ до значения $W_{\text{ВЫХ.0}}$ зависит от вход-

ного иммитанса $W_{\text{ВХ}}$. Величину $W_{\text{ВЫХ.0}}$ назовем уровнем ограничения выходного иммитанса.

В общем случае иммитанс — комплексная величина: $W = \text{Re}W + j\text{Im}W$, поэтому в частном случае следует рассматривать ограничение или его вещественной ($\text{Re}W$), или мнимой ($\text{Im}W$) составляющей. Ограничитель по $\text{Re}W$ назовем «R-ограничитель». Учитывая, что мнимая составляющая иммитанса может иметь емкостной или индуктивный характер, в первом случае будем рассматривать емкостной ограничитель (C-ограничитель), а во втором — индуктивный (L-ограничитель). Кроме того, в качестве частного случая можно рассматривать ограничитель иммитанса по модулю $|W| = \sqrt{\text{Re}W^2 + \text{Im}W^2}$. Возможная классификация ограничителей иммитанса представлена на рис. 2.

Каждый из перечисленных ограничителей будем характеризовать видом ограничения, определяемым передаточной иммитансной характеристикой ограничителя $W_{\text{ВЫХ}} = T(W_{\text{ВХ}})$. Как показано на графиках рис. 3, это может быть ограничение «сверху», «снизу» или двухстороннее ограничение.

Кроме того, R-ограничители могут быть поделены на устройства для постоянного и для переменного тока. Иммитансные ограничители, которые могут быть реализованы только на R-, L- или C-компонентах, без использования источника питания, назовем «пассивными», а на комбинации R-, L- или C-компонентов и полупроводниковых приборов с использованием источников питания — «активными».

Как показано на рис. 3, а, вне диапазона ограничения зависимость $W_{\text{ВЫХ}} = T(W_{\text{ВХ}})$ может быть как линейной (линия 1), так и нелинейной (линия 2). В первом случае ограничитель иммитанса назовем «линейными», а во втором случае — «нелинейными».

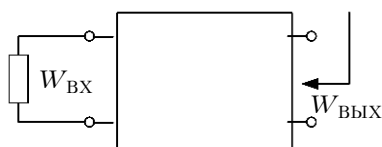


Рис. 1. Обобщенная схема ограничителя иммитанса

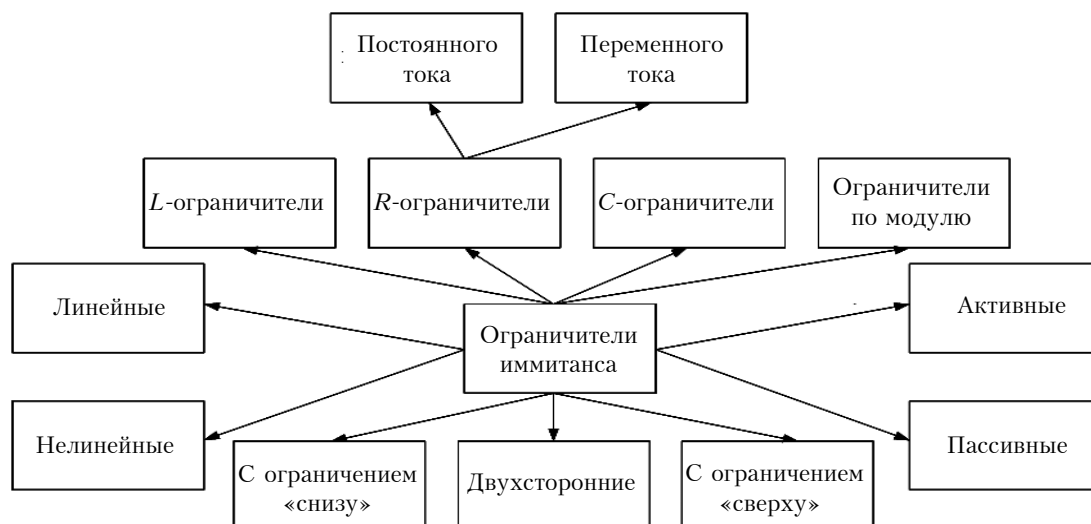


Рис. 2. Классификация ограничителей иммитанса

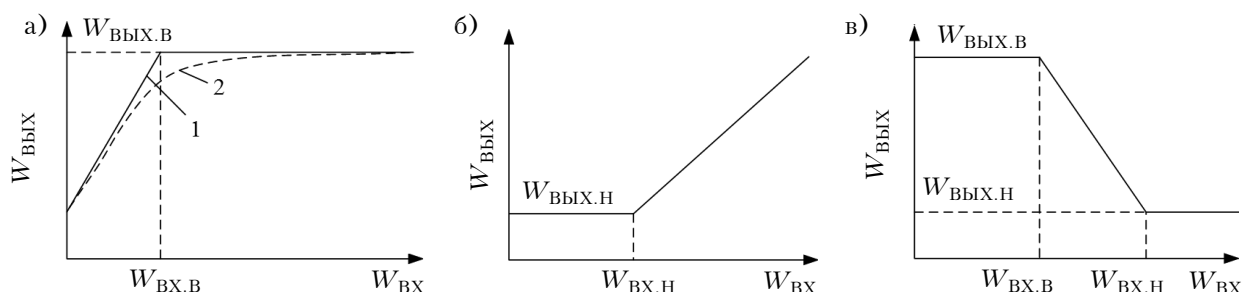


Рис. 3. Передаточные иммитансные характеристики ограничителей иммитанса с ограничением «сверху» (а), «снизу» (б) и с двухсторонним ограничением (в)

Предлагаемая классификация ограничителей иммитанса по мере развития таких устройств может быть дополнена.

Обоснование выбора основных параметров ограничителя иммитанса

Из анализа передаточных иммитансных характеристик (рис. 3) рассматриваемых ограничителей, а также системы параметров ограничителя напряжения [3], предлагается следующая система основных параметров ограничителя иммитанса:

- нижний и верхний уровни ограничения выходного иммитанса $W_{ВЫХ.Н}$, $W_{ВЫХ.В}$;
- нижние ($W_{ВХ.Н}$) и верхние ($W_{ВХ.В}$) значения входного иммитанса, соответствующие нижнему и верхнему уровням ограничения;
- диапазон возможных значений выходного иммитанса $\Delta W_{ВЫХ} = |W_{ВЫХ.В} - W_{ВЫХ.Н}|$;
- крутизна ограничителя иммитанса $S = \Delta W_{ВЫХ} / (W_{ВХ.В} - W_{ВХ.Н})$;
- время срабатывания τ (или задержка);
- верхняя и нижняя граничные частоты f_H , f_B ;
- центральная рабочая частота $f_0 = (f_H + f_B) / 2$;
- абсолютная рабочая полоса частот $\Delta f = (f_B - f_H)$;
- относительный диапазон рабочих частот $\xi = \Delta f / f_0$.

На рис. 3 показаны идеальные передаточные характеристики ограничителей иммитанса. Для реальных же ограничителей эти зависимости нелинейные, например пунктирная линия 2 на рис. 3, а. Для оценки степени нелинейности предлагается использовать коэффициент нелинейности вида

$$K_{н.л} = \left[\frac{dW_{ВЫХ.Н}}{dW_{ВХ}} - \frac{dW_{ВЫХ.В}}{dW_{ВХ}} \right] / \frac{dW_{ВЫХ.Н}}{dW_{ВХ}}.$$

Для случая использования ограничителя иммитанса в измерительной аппаратуре важно знать, с какой точностью устанавливается граничное значение выходного иммитанса. Для ее оценки используем значение относительной погрешности установки уровня ограничения:

$\delta_H = \Delta W_{ВЫХ.Н} / W_{ВЫХ.Н}$; $\delta_B = \Delta W_{ВЫХ.В} / W_{ВЫХ.В}$, где $\Delta W_{ВЫХ.Н}$, $\Delta W_{ВЫХ.В}$ — абсолютное отклонение значения выходного иммитанса от заданного уровня $W_{ВЫХ.Н}$ или $W_{ВЫХ.В}$ при достижении входным иммитансом значений $W_{ВХ.Н}$ и $W_{ВХ.В}$ соответственно.

Все перечисленные параметры не являются уникальными и могут быть измерены с помощью стандартной аппаратуры известными методами, и поэтому в дальнейшем эти вопросы мы обсуждать не будем.

Разработка ограничителей иммитанса

В качестве примера рассмотрим четырехполюсники, образованные последовательным и параллельным включением компонентов с иммитансом, соответственно, W_1 и W_2 (рис. 4). Ко входу таких четырехполюсников подключается цепь с иммитансом W_{BX1} и W_{BX2} соответственно. Выходной иммитанс первого четырехполюсника (рис. 4, а) равен

$$W_{ВЫХ1} = W_{BX1} + W_1, \quad (1)$$

$$W_{ВЫХ2} = W_{BX2} W_2 / (W_{BX2} + W_2). \quad (2)$$

Рассмотрим три варианта схемы четырехполюсника, представленной на рис. 4, а.

В первом варианте (рис. 5, а), когда $W_{BX1} = R_{BX1}$, а $W_1 = R_1$, имеем:
 $W_{ВЫХ1} = R_{ВЫХ1} = R_{BX1} + R_1$.

Если $R_{BX1} \neq 0$, тогда $R_{ВЫХ1} > R_1$. Если $R_{BX1} = 0$, тогда $R_{ВЫХ1} = R_1$. Таким образом, выходное активное сопротивление схемы при любых изменениях значения $R_{BX1} > 0$ не может быть меньше значения R_1 , которое является уровнем ограничения снизу, а рассматриваемый четырехполюсник, согласно данному выше определению, является R-ограничителем иммитанса снизу.

Во втором варианте (рис. 5, б), когда $W_{BX1} = X_{BX1L} = \omega L_{BX1}$, а $W_1 = X_{1L} = \omega L_1$, имеем:
 $W_{ВЫХ1L} = X_{ВЫХ1L} = X_{BX1L} + X_{1L} = \omega(L_{BX1} + L_1)$.

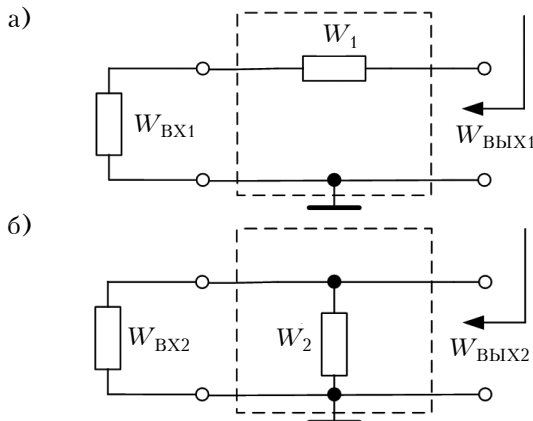


Рис. 4. Обобщенные схемы пассивных ограничителей иммитанса по нижнему (а) и верхнему (б) уровням

Если $X_{BX1L} \neq 0$, тогда $X_{ВЫХ1L} > X_{1L}$. Если $X_{BX1L} = 0$, тогда $X_{ВЫХ1L} = X_{1L}$. Таким образом, выходное индуктивное сопротивление схемы $X_{ВЫХ1L}$ при любых изменениях значения $X_{BX1L} \geq 0$ не может быть меньше значения X_{1L} , которое является уровнем ограничения снизу, а рассматриваемый четырехполюсник является L-ограничителем иммитанса.

В третьем варианте (рис. 5, в), когда $W_{BX1} = X_{BX1C} = 1/(\omega C_{BX1})$, а $W_1 = X_{1C} = 1/(\omega C_1)$, имеем:

$$W_{ВЫХ1C} = X_{ВЫХ1C} = X_{BX1C} + X_{1C} = (C_{BX1} + C_1) / (\omega C_1 C_{BX1}).$$

Если $X_{BX1C} \neq 0$, тогда $X_{ВЫХ1C} > X_{1C}$. Если $X_{BX1C} = 0$, тогда $X_{ВЫХ1C} = X_{1C}$. Таким образом, выходное емкостное сопротивление схемы $X_{ВЫХ1C}$ при любых изменениях значения $X_{BX1C} \neq 0$ не может быть меньше значения X_{1C} , которое является уровнем ограничения снизу, а рассматриваемый четырехполюсник является C-ограничителем иммитанса.

Рассмотрим три варианта схемы четырехполюсника, представленной на рис. 4, б.

В первом варианте (рис. 5, г), когда $W_{BX2} = R_{BX2}$, а $W_2 = R_2$, имеем:

$$W_{ВЫХ2} = R_{ВЫХ2} = (R_{BX2} + R_2) / (R_{BX2} + R_2).$$

Если $R_{BX2} \neq 0$, тогда $R_{ВЫХ2} < R_2$. Если $R_{BX2} \gg R_2$, тогда $R_{ВЫХ2} \approx R_2$. Таким образом, выходное активное сопротивление схемы при любых изменениях значения R_{BX2} не может быть больше значения R_2 , которое определяет уровень ограничения сверху, а рассматриваемый четырехполюсник согласно данному выше определению является R-ограничителем иммитанса сверху.

Во втором варианте (рис. 5, д), когда $W_{BX2} = X_{BX2L} = \omega L_{BX2}$, а $W_2 = X_{2L} = \omega L_2$, имеем:
 $W_{ВЫХ2L} = X_{ВЫХ2L} = (X_{BX2L} X_{2L}) / (X_{BX2L} + X_{2L}) = \omega(L_{BX2} L_2) / (L_{BX2} + L_2)$.

Если $X_{BX2L} \neq 0$, тогда $X_{ВЫХ2L} < X_{2L}$. Если $X_{BX2L} \gg X_{2L}$, тогда $X_{ВЫХ2L} \approx X_{2L}$. Таким образом, выходное индуктивное сопротивление схемы при любых изменениях значения $X_{BX2L} > 0$ не может быть больше значения X_{2L} , которое определяет уровень ограничения сверху, а рассматриваемый

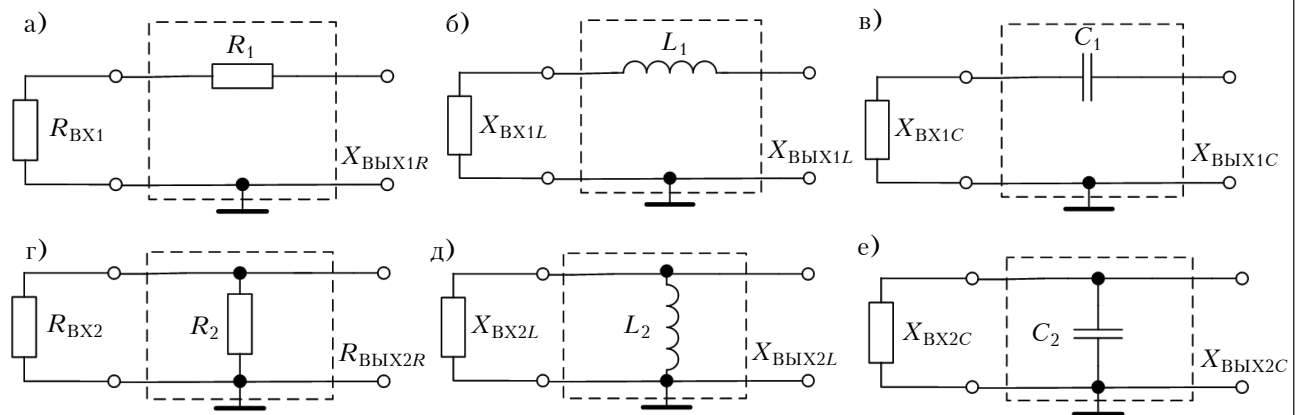


Рис. 5. Реальные схемы пассивных ограничителей иммитанса с ограничением «снизу» (а–в) и «сверху» (г–е)

четырёхполюсник является L -ограничителем иммитанса сверху.

В третьем варианте (рис. 5, е), когда $W_{BX2}=X_{BX2C}=1/(\omega C_{BX2})$, а $W_2=X_{2C}=1/(\omega C_2)$, имеем:

$$W_{ВЫХ2C}=X_{ВЫХ2C}=(X_{BX2C} X_{2C})/(X_{BX2C}+X_{2C})=1/(\omega(C_{BX2C}+C_2)).$$

Если $X_{BX2C} \neq 0$, тогда $X_{ВЫХ2C} < X_{2C}$. Если $X_{BX2C} \gg X_{2C}$, тогда $X_{ВЫХ2C} \approx X_{2C}$. Таким образом, выходное индуктивное сопротивление схемы при любых изменениях значения $X_{BX2C} > 0$ не может быть больше значения X_{2C} , которое определяет уровень ограничения сверху, а рассматриваемый четырёхполюсник является C -ограничителем иммитанса сверху.

Следует отметить, что необходимым условием работоспособности рассмотренных схем является совпадение характеров входных иммитансов W_{BX1} , W_{BX2} и иммитансов W_1 , W_2 , задающих уровень ограничения. Кроме того, полученные результаты соответствуют случаю использования идеальных RLC -компонентов.

Двухстороннее ограничение иммитанса возможно при каскадировании односторонних ограничителей. В случае когда необходимо осуществить ограничение по уровню проводимости, соответствующая схема ограничения по верхнему уровню сопротивления будет работать как ограничитель проводимости по нижнему уровню.

Реальные RLC -компоненты обладают паразитными активным сопротивлением, индуктивностью выводов и межэлектродными емкостями. Кроме того, входной иммитанс W_{BX} не может быть чисто активным или реактивным, что влияет на характер представленных иммитансных характеристик рассматриваемых ограничителей и требует проведения исследования для оценки этого влияния.

Влияние паразитных иммитансов на передаточную характеристику ограничителя иммитанса

Рассмотрим влияние паразитных составляющих входного иммитанса, который должен быть ограничен. Для R -ограничителей это индуктивная составляющая ($\text{Im}Z_{BX}$), а для L - и C -ограничителей — активная ($\text{Re}Z_{BX}$). С целью упрощения анализа на данном этапе исследований будем считать, что иммитансы $Z_1(R_1, L_1, C_1)$ и $Z_2(R_2, L_2, C_2)$ являются «идеальными», т. е. не имеют паразитных составляющих. С учетом этих допущений и в соответствии с формулами (1) и (2), функции иммитансных передаточных

характеристик при неидеальности входного иммитанса W_{BX1} и W_{BX2} можно представить в следующем виде:

— R -ограничитель снизу:

$$\text{Re}[Z_{ВЫХ}(R_{BX1})] = R_1 + R_{BX1}; \quad (3)$$

— R -ограничитель сверху:

$$\text{Re}[Z_{ВЫХ}(R_{BX2})] = \frac{R_2(R_{BX2}^2 + R_2 R_{BX2} + X_{L.BX.п}^2)}{R_{BX1}^2 + 2R_2 R_{BX2} + X_{L.BX.п}^2 + R_2^2},$$

где $X_{L.BX.п}$ — входное паразитное индуктивное сопротивление выводов;

— L -ограничитель снизу:

$$\text{Im}[Z_{ВЫХ}(X_{L.BX})] = X_{L.BX} + X_{L1}; \quad (5)$$

— L -ограничитель сверху:

$$\text{Im}[Z_{ВЫХ}(L_{BX2})] = \frac{X_{L2} R_{BX.п}^2 + X_{L.BX2} X_{L2} (X_{L.BX2} + X_{L2})}{R_{BX.п}^2 + X_{L.BX2}^2 + 2X_{L.BX2} X_{L2} + X_{L2}^2},$$

где $R_{BX.п}$ — входное паразитное активное сопротивление выводов;

— C -ограничитель снизу:

$$\text{Im}[Z_{ВЫХ}(C_{BX1})] = X_{C1} + \frac{R_{BX.п}^2 X_{C.BX1}}{R_{BX.п}^2 + X_{C.BX1}^2}; \quad (7)$$

— C -ограничитель сверху: см. формулу (8) внизу страницы;

При неидеальности ограничительных элементов W_1 и W_2 формулы (1) и (2) примут следующий вид:

— R -ограничитель снизу:

$$\text{Re}[Z_{ВЫХ}(R_{BX1})] = R_2 + R_{BX2}; \quad (9)$$

— R -ограничитель сверху:

$$\text{Re}[Z_{ВЫХ}(R_{BX2})] = \frac{R_2(R_{BX2}^2 + R_2 R_{BX2} + X_{L.п.о}^2)}{R_{BX2}^2 + 2R_2 R_{BX2} + X_{L.п.о}^2 + R_2^2}, \quad (10)$$

где $X_{L.п.о}$ — паразитное индуктивное сопротивление выводов ограничительного элемента W_2 ;

— L -ограничитель снизу:

$$\text{Im}[Z_{ВЫХ}(X_{L.BX})] = X_{L.BX} + X_{L2}; \quad (11)$$

— L -ограничитель сверху:

$$\text{Im}[Z_{ВЫХ}(L_{BX2})] = \frac{X_{L2} R_{п.о}^2 + X_{L.BX2} X_{L2} (X_{L.BX2} + X_{L2})}{R_{п.о}^2 + X_{L.BX2}^2 + 2X_{L.BX2} X_{L2} + X_{L2}^2},$$

где $R_{п.о}$ — паразитное активное сопротивление выводов ограничительного элемента W_2 ;

— C -ограничитель снизу:

$$\text{Im}[Z_{ВЫХ}(C_{BX1})] = \text{Im}\left(X_{C.BX1} + \frac{R_{п.о}^2 X_{C1}}{R_{п.о}^2 + X_{C1}^2}\right); \quad (13)$$

— C -ограничитель сверху: см. формулу (14) внизу страницы.

$$\text{Im}[Z_{ВЫХ}(C_{BX2})] = \frac{R_{BX.п.C} X_{C.BX2} X_{C2} (R_{BX.п.C} X_{C.BX2} + R_{BX.п.C} X_{C2})}{R_{BX.п.C}^2 X_{C.BX2}^2 + 2R_{BX.п.C} X_{C.BX2} X_{C2} + R_{BX.п.C}^2 X_{C2}^2 + X_{C.BX2}^2 X_{C2}^2}, \quad (8)$$

где $R_{BX.п.C}$ — входное паразитное активное сопротивление емкостной утечки.

$$\text{Im}[Z_{ВЫХ}(C_{BX2})] = \frac{R_{п.о.C} X_{C.BX2} X_{C2} (R_{п.о.C} X_{C.BX2} + R_{п.о.C} X_{C2})}{R_{п.о.C}^2 X_{C.BX2}^2 + 2R_{п.о.C} X_{C.BX2} X_{C2} + R_{п.о.C}^2 X_{C2}^2 + X_{C.BX2}^2 X_{C2}^2}, \quad (14)$$

где $R_{п.о.C}$ — паразитное активное сопротивление емкостной утечки ограничительного элемента W_2 .

Из анализа формул (3), (5), (9) и (11) видно, что паразитные составляющие $R_{BX.п}$, $X_{L.BX.п}$, $R_{п.о}$, $X_{L.п.о}$ не влияют на передаточную характеристику R - и L -ограничителей «снизу».

Влияние паразитных составляющих входного иммитанса (через добротность) на передаточные характеристики ограничителей показаны на рис. 6–9.

Как видно из рис. 6, паразитная индуктивность входного сопротивления $L_{BX.п}$ и паразитное сопротивление $R_{BX.п}$ не влияют на уровень ограничения. Иммитансная передаточная характеристика R -ограничителя (рис. 6, а) при добротности входного сопротивления $Q_R(L_{BX.п}) = \omega L_{BX.п}/R_{BX.п} = 0,1–0,2$ близка к идеальной, а L -ограничителя (рис. 6, б) приближается к идеальной с увеличением $Q_L(R_{BX.п})$.

Как следует из рис. 7, паразитное сопротивление $R_{BX.п.с}$ не влияет на уровень ограничения C -ограничителя «снизу» и влияет

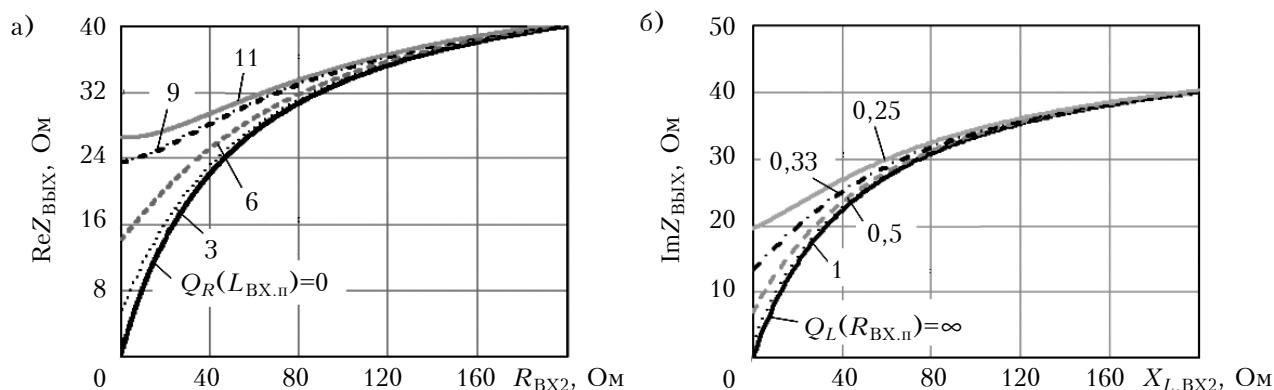


Рис. 6. Влияние на иммитансные передаточные характеристики ограничителей «сверху» входных паразитных составляющих при различных значениях добротности: а – $L_{BX.п}$ в R -ограничителе; б – $R_{BX.п}$ в L -ограничителе

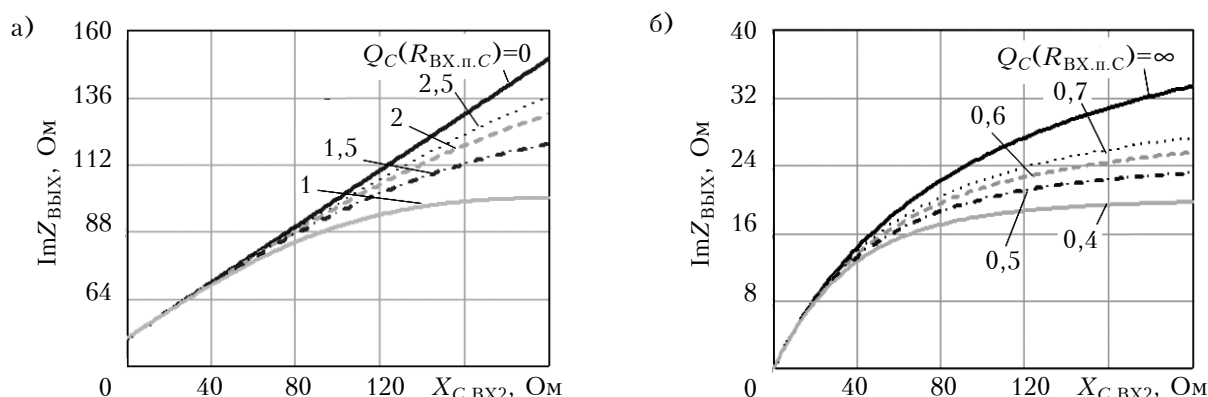


Рис. 7. Влияние входного паразитного сопротивления $R_{BX.п.с}$ на иммитансные передаточные характеристики C -ограничителя «снизу» (а) и «сверху» (б) при различных значениях добротности

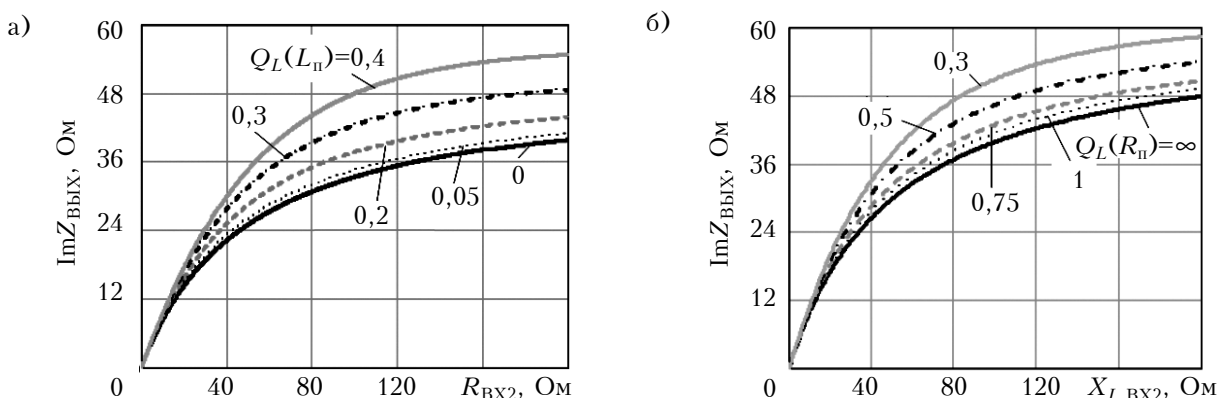


Рис. 8. Влияние на иммитансные передаточные характеристики ограничителей «сверху» паразитных составляющих ограничительного элемента при различных значениях добротности: а – $L_п$ в R -ограничителе; б – $R_п$ в L -ограничителе

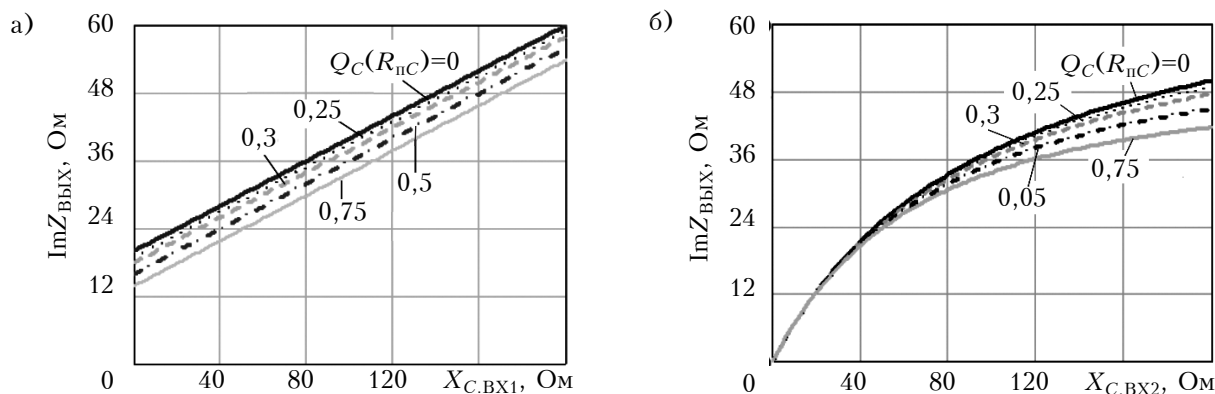


Рис. 9. Влияние паразитного сопротивления ограничительного элемента $R_{п.с}$ на иммитансные передаточные характеристики C -ограничителя «снизу» (а) и «сверху» (б) при различных значениях добротности

на C -ограничитель «сверху». В первом случае (рис. 7, а) при добротности $Q_C(R_{п.с}) = 1/(\omega C_{BX1} R_{п.с}) > 5$ иммитансная передаточная характеристика совпадает с идеальной. Во втором случае (рис. 7, б) при уменьшении добротности снижается уровень ограничения и при $Q_C(R_{п.с}) > 2$ отклонение уровня ограничения от идеальной кривой составляет не более 2%.

Влияние паразитных иммитансов на R - и L -ограничители «сверху» можно увидеть из графиков рис. 8. При росте добротности ограничительного элемента $Q_R(L_{п}) = \omega L_{п} / R_2$ уровень ограничения R -ограничителя увеличивается, L -ограничителя уменьшается. В первом случае (рис. 8, а) иммитансная передаточная характеристика при $Q_R(L_{п}) = 0,1 - 0,3$ отличается от идеальной не более чем на 1%, во втором (рис. 8, б) — близка к идеальной при $Q_L(R_{п}) = \omega L_2 / R_{п} \approx \infty$.

Из приведенных на рис. 9 иммитансных передаточных характеристик C -ограничителей «снизу» и «сверху» видно влияние активного сопротивления емкостной утечки $R_{п.с}$ на уровень ограничения — он уменьшается с ростом добротности $Q_C(R_{п.с}) = 1/(\omega C_2 R_{п.с})$. При $Q_C(R_{п.с}) = 0,2 - 0,3$ отклонения уровня ограничения от идеальной кривой составляют не более 3%.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования показали, что предложенные пассивные R -, L - и C -ограничители способны ограничивать иммитанс сверху и снизу. Проведенная оценка влияния входных паразитных составляющих на иммитансную передаточную характеристику ограничителей показала, что в большинстве случаев они не влияют на рассмотренные устройства, в том числе на R -ограничители «сверху» при входной добротности элемента $Q_R(L_{BX.п}) = 0,1 - 0,2$ и на L -ограничители «сверху» при высокодобротных входных контурах с $Q_L(R_{BX.п}) > 2$. Анализ также показал, что для C -ограничителей при входном паразитном иммитансе следует стремиться к высокодобротным контурам с $Q_C(R_{п.с}) > 3$, а при паразитном иммитансе ограничительного элемента сле-

дует подбирать низкодобротные контуры с добротностью $Q_C(R_{п.с}) > 0,2$.

Активные преобразователи иммитанса и сравнительную оценку их параметров авторы планируют представить в следующих публикациях.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Meyer C., Schroder S., De Doncker R. W. Solid-state circuit breakers and current limiters for medium-voltage systems having distributed power systems // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2004. — Vol. 19, N 5. — P. 1333–1340.
2. Noe M., Steurer M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status // Superconductor Science and Technology. — 2007. — Vol. 20, N 3. — P. 15.
3. Кашкаров А. Радиоэлектронные конструкции на любой вкус. — Москва: Эксмо, 2008.
4. Fernandez E., Beriain A., Solar H. et al. Low power voltage limiter design for a full passive UHF RFID sensor // Proceed. of IEEE 54th Midwest Symposium "Circuit and Systems" (MWSCAS). — Korea, Seoul. — 2011. — 4 p. — DOI: 10.1109/MWSCAS.2011.6026504.
5. Shoucheng Li, Jingpeng Shen, Shan Liu, Ke Lin. A novel voltage limiter circuit for passive RFID tag // Proceed. of IET International Conference "Information Science and Control Engineering 2012" (ICISCE 2012). — China, Shenzhen. — 2012. — 4 p. — DOI:10.1049/cp.2012.2400
6. Takeshima T., Takada M., Shimizu T. et al. Voltage limiters for DRAM's with substrate-plate-electrode memory cells // IEEE Journal of Solid-State Circuits. — 1988. — Vol. 23, N 1. — P. 48–52. — DOI: 10.1109/4.255
7. Ліщинська Л. Б., Філінюк М. А. Імітансна логіка // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2010. — №. 2. — С. 25–31.
8. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи / Перевод с англ. под ред. Л. В. Алексеева и Ф. В. Кушнера. — Москва: Связь, 1971.
9. Бенинг Ф. Отрицательные сопротивления в электронных схемах. — Москва: Сов. радио, 1975.
10. Шкурин Г. П. Справочник по новым радиоизмерительным приборам. — Воениздат, 1966.
11. Middleton W., Valkenburg M. E. V. Reference data for engineers: radio, electronics, computer and communications. — USA: Newnes, 2002.

Дата поступления рукописи
в редакцию 19.02 2015 г.

Н. А. ФІЛИНЮК, Л. Б. ЛІЩИНСЬКА, Р. Ю. ЧЕХМЕСТРУК

Україна, Вінницький національний технічний університет

E-mail: chehroma@yandex.ru

ПАСИВНІ ОБМЕЖУВАЧІ ІМІТАНСУ

Запропоновано R -, L -, C -обмежувачі імідансу у вигляді чотириполюсника, вихідний імідансу якого до певного значення залежить від величини вхідного. Наведено класифікацію обмежувачів імідансу. Обґрунтовано основні параметри. Розроблено пасивні R -, L -, C -обмежувачі з можливістю обмеження імідансу зверху і знизу. Проведено оцінку впливу вхідних паразитних складових імідансу на передаткову характеристику обмежувачів.

Ключові слова: обмежувач імідансу, передаткова характеристика, рівень обмеження.

DOI: 10.15222/TKEA2015.2-3.03
UDC 621.37

N. A. FILINYUK, L. B. LISCHINSKAYA,
R. Yu. CHEKHMESTRUK

Ukraine, Vinnytsya National Technical University
E-mail: chehroma@yandex.ru

PASSIVE IMMITTANCE LIMITERS

The paper presents quadripole R , L , C immittance limiters, in which output immittance to the certain value depends on the input immittance. A classification of immittance limiters is given. Basic parameters are considered: low and high levels of output immittance limiters; low and high values of input immittance, corresponding to low and high levels of limitation, accordingly; range of possible values of output immittance; steepness of immittance limiters; time of wearing-out (or delay); high and low cutoff frequencies; central working frequency; frequency band; relative range of working frequencies; non-linearity coefficient. The authors have designed passive R -, L -, C -limiters with possibility of limitation from above and from below. The influence of the input parasitic immittances on the immittance transfer characteristic is evaluated. In most cases parasite immittance does not influence the considered devices, including R -limiters «from above» with the input quality factor of $Q_R(L_{imp})=0,1...0,2$ and L -limiters «from above» with high-quality input circuits with $Q_L(R_{imp})>2$. The analysis also shows that high-quality circuits with $Q_C(R_{impC})>3$ should be used in C -limiters with input parasitic immittances, while at parasitic immittance of the limiting element low-quality circuits with $Q_C(R_{nC})>0,2$ should be selected.

Keywords: immittance limiter, transfer characteristic, limitation level.

REFERENCES

1. Meyer C., Schroder S., De Doncker R. W. Solid-state circuit breakers and current limiters for medium-voltage systems having distributed power systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, vol. 19, no 5, pp. 1333-1340.
2. Noe M., Steurer M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status. *Superconductor Science and Technology*, 2007, vol. 20, no 3, p. 15.
3. Kashkarov A. *Radioelektronnye konstruksii na lyuboi vkus* [Radio-electronic design any taste]. Moscow, Eksmo, 2008, 368 p. (Rus)
4. E. Fernández, A. Beriain, H. Solar, A. García-Alonso, R. Berenguer, J. Sosa, J. M. Monzyn, S. García-Alonso, J. A. Montiel-Nelson. Low power voltage limiter design for a full passive UHF RFID sensor. *Proceed. of IEEE 54th Midwest Symposium "Circuit and Systems" (MWSCAS)*. Korea, Seoul, 2011, 4 p. DOI: 10.1109/MWSCAS.2011.6026504.
5. Shoucheng Li, Jingpeng Shen, Shan Liu, Ke Lin. A novel voltage limiter circuit for passive RFID tag. *Proceed. of IET International Conference "Information Science and*

Control Engineering 2012" (ICISCE 2012), China, Shenzhen, 2012, 4 p. DOI:10.1049/cp.2012.2400

6. Takeshima T., Takada M., Shimizu T., Katoh T., Sakamoto M. Voltage limiters for DRAM's with substrate-plate-electrode memory cells. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1988, vol. 23, no 1, pp. 48-52. DOI: 10.1109/4.255

7. Lishchins'ka L. B., Filinyuk M. A. [Immittance logic]. *Information Technology and Computer Engineering*, 2010, no 2, pp. 25-31. (Ukr)

8. Matthaei G., Jones E.M.T., Young L. *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks and Coupling Structures*. Hill, New York, 1964.

9. Bening F. *Otritsatel'nye soprotivleniya v elektronnykh skhemakh* [Negative resistance in electronic schemes]. Moscow, Sov. radio, 1975, 288 p.

10. Shkurin G. P. *Spravochnik po novym radioizmeritel'nym priboram* [Handbook on the new radio devices] Voenizdat, 1966, 358 p.

11. Middleton W., Valkenburg M. E. V. *Reference data for engineers: radio, electronics, computer and communications*. Newnes, Woburn MA, 2002, 1696 p.

К. А. КНОП, д. т. н. С. Ю. ЛУЗИН

Россия, г. Санкт-Петербург, ООО «Эремекс»

E-mail: luzin@eremex.com

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ МЕЖСЛОЙНЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ГРУППЕ ПРОВОДНИКОВ

Большинство САПР печатных плат предлагают весьма ограниченный выбор «шаблонов» для размещения межслойных переходов на шине (группе проводников) — только однорядный и двухрядный варианты. В статье продемонстрирована некорректность такого ограничения, поскольку в этом случае ресурсы монтажного пространства используются неоптимально. Для определенного класса задач о расположении переходных отверстий при смене слоя шины найдено и приведено оптимальное решение — оно также оказалось регулярным (периодическим), но многорядным. Показано, что задача вычисления параметров оптимального размещения в общем виде сводится к нахождению числа рядов переходов, при котором площадь топологического фрагмента будет минимальной.

Ключевые слова: печатный монтаж, межслойный переход, группа проводников.

При автоматическом проектировании печатного монтажа обычно минимизируются суммарная длина проводников и число межслойных переходов. Что же касается оптимизации расстановки группы переходов на группе проводников, то такая задача нигде в известных авторам источниках не ставилась и не рассматривалась, хотя от ее решения существенно зависит эффективность использования ресурсов монтажного пространства при трассировке. В большинстве САПР для групповой расстановки переходов используются однорядные либо двухрядные шаблоны с возможностью поворота на угол, кратный 45° (восемь направлений). В частности, именно такая расстановка переходов упоминается в докладе Чарльза Пфейла (рис. 1), технического директора компании MentorGraphics [1].

Однако в [2] было показано, что однорядное расположение переходов, например, на группе

пересекающихся проводников приводит к неэкономичному (заведомо неоптимальному) использованию монтажного пространства. В настоящей статье будет продемонстрировано, что и для проводников, которые не пересекаются, при однорядном и двухрядном размещении переходов монтажное пространство используется нерационально, а также будет приведен пример оптимального варианта расположения переходов для конкретных параметров размещения.

Следует отметить, что указанное нерациональное использование площади касается любого соотношения параметров монтажа, кроме тривиального случая, когда диаметр переходного отверстия равен ширине проводника — при этом не требуется никакого дополнительного пространства.

Пусть заданы ширина проводника w_1 , меньшая, чем диаметр d переходного отверстия, и минимальный зазор w_0 между переходами. Если группа (ряд) состоит из N проводников, то ширина исходного ряда равна

$$L_1 = w_1 \cdot N + w_0 \cdot (N - 1) \quad (1)$$

Одно- и двухрядная расстановка переходов на этих проводниках схематично показаны на рис. 2. В обоих случаях расстояния между краями соседних переходов принимают минимально возможное значение w_0 (то есть расстояние между их центрами равно $d + w_0$). Кроме того, на рис. 2, а минимально возможным должно быть также расстояние между переходами A_1 и A_3 , A_2 и A_4 , ..., A_5 и A_7 — поскольку между ними должен пройти один проводник, расстояние между центрами этих переходных отверстий должно быть равно $d + w_1 + 2w_0$. Все эти критичные (минимальные)

Via Patterns

- ♦ Four styles
 - Automatic
 - Arbitrary
 - Single row
 - Double row
- ♦ Two directions
 - Direct
 - Reverse
- ♦ Eight rotations
- ♦ 34 possible combinations

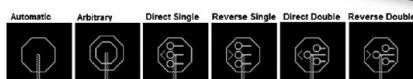


Рис. 1. Слайд из презентации Чарльза Пфейла [1]

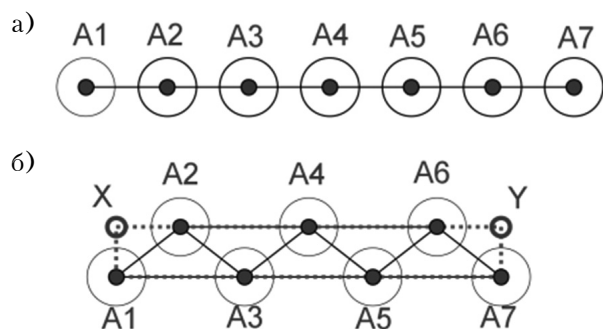


Рис. 2. Одно- (а) и двухрядное (б) размещение переходов

расстояния показаны на рисунках сплошными отрезками. На рис. 2, б показаны точки X и Y, в которых могут оказаться крайний левый (первый) и крайний правый (седьмой) проводники.

Пусть диаметр переходного отверстия будет больше ширины проводника: $d > w_1$, а максимальное количество переходов в одном горизонтальном ряду равно m ($m=7$ для рис. 2, а; $m=4$ для рис. 2, б). Тогда длина ряда, в котором должны поместиться m переходов и $(N-m)$ других проводников, равна

$$L2 = m \cdot d + w_1 \cdot (N-m) + w_0 \cdot (N-1). \quad (2)$$

Поскольку $d > w_1$, справедливо неравенство $L2 > L1$, а значит (как показано в [3]), для расширения и сужения шины по обе стороны от зоны размещения переходов необходимы «буферные зоны», форма которых зависит от трассировки:

- при ортогональной трассировке — в форме прямоугольника длиной $L2$ и высотой $h = L1/2$ (в зависимости от параметров это может быть и шестиугольник);

- при трассировке под углом, кратным 45° , — в форме трапеции с основаниями $L1$ и $L2$ и высотой $h1 = (L2 - L1)/2$;

- при трассировке под произвольным углом — в форме трапеции с основаниями $L1$ и $L2$ и высотой $h2$, зависящей от соотношения параметров w_0 , w_1 и d , но всегда меньшей, чем $h1$.

При трассировке под произвольным углом зона дополнительно занимаемого монтажного

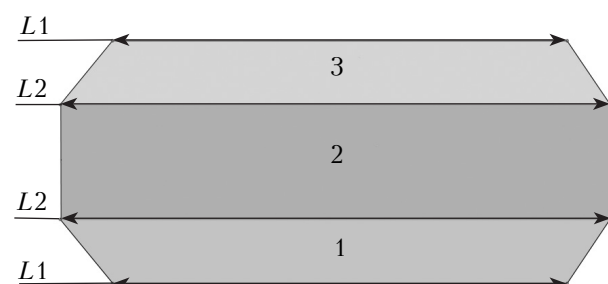


Рис. 3. Зона размещения переходов (2) и буферные трапеции (1, 3)

пространства имеет вид, схематически показанный на рис. 3. Здесь 1 — трапеция расширения исходной шины шириной $L1$ для подхода к нижнему ряду переходов длиной $L2$; 2 — прямоугольник, в котором размещены все переходы, 3 — трапеция сужения шины от верхнего ряда переходов (также длиной $L2$) к исходной ширине ($L1$).

Продemonстрируем сказанное на примере расчета для значений $w_0=w_1=0,2$ мм, $N=25$, $d=0,5$ мм.

При однорядном размещении (см. нижнюю строку в табл. 1) $L1=9,8$ мм, $L2=17,3$ мм, $h1=2,79$ мм, поэтому площадь каждой из трапеций $S1$ и $S3$ равна $37,74$ мм². Высота прямоугольника ($h=d+2w_0$) равна $0,9$ мм, поэтому его площадь $S2$ равна $15,57$ мм² (см. нижнюю строку в табл. 2). Таким образом, для этого слу-

Таблица 1

Параметры трапеции

Число переходов в ряду	Длина ряда $L2$	Высота h	Площадь $S1$
1	10,10	1,41	14,069
2	10,40	1,43	14,417
3	10,70	1,51	15,468
4	11,00	1,60	16,640
5	11,30	1,69	17,834
6	11,60	1,35	14,393
7	11,90	1,85	20,116
8	12,20	1,93	21,216
9	12,50	2,00	22,293
12	13,40	2,19	25,414
13	13,70	2,25	26,424
25	17,30	2,79	37,740

Таблица 2

Параметры прямоугольника

Число переходов в ряду	Длина ряда $L2$	Количество рядов	Высота h	Площадь $S2$
1	10,10	25	14,47	146,179
2	10,40	13	7,57	78,776
3	10,70	9	5,27	56,405
4	11,00	7	4,12	45,289
5	11,30	5	3,00	33,920
7	11,90	4	2,41	28,643
9	12,50	3	1,85	23,170
13	13,70	2	1,32	18,038
25	17,30	1	0,90	15,570

Таблица 3

Суммарные характеристики

Количество рядов	Число переходов в ряду			Площадь			
	Трапеция 1	Прямоугольник	Трапеция 3	S1	S2	S3	S
25	1	1	1	14,069	146,179	14,069	174,317
13	1	2	2	14,069	78,776	14,417	107,262
9	2	3	2	14,417	56,405	14,417	85,239
7	3	4	3	15,468	45,289	15,468	76,225
6	4	5	4	16,640	33,920	16,640	67,200
5	5	5	5	17,834	33,920	17,834	69,588
4	6	7	6	14,393	28,643	14,393	57,429
3	8	9	8	21,216	23,170	21,216	65,602
2	12	13	13	25,414	18,038	26,424	69,877
1	25	25	25	37,740	15,570	37,740	91,050

чая (см. нижнюю строку в табл. 3) общая площадь занятого монтажного пространства S равна 91,05 мм².

При двухрядном размещении переходов (табл. 1–3, строки с двумя рядами и 12/13 переходами в ряду) суммарная площадь равна $S=69,877$ мм². Это существенно лучше, но, безусловно, не предел.

Основной недостаток таких размещений — большая длина $L2$, из-за которой обе трапеции имеют большую высоту, что приводит к неоправданному увеличению занятой площади. Поэтому далее рассмотрим такие схемы размещения переходов, в которых никакой «горизонтальный» ряд не будет столь длинным.

На рис. 4 показаны два варианта регулярной трехрядной схемы. В ней критичными являются не только расстояния между соседними переходами

($A1A2 = \dots = A5A6 = d+w0$) и переходами через один ($A2A4 = A3A5 = A5A7 = d+w1+2w0$), но и длины $A1A4 = A2A5 = A3A6 = A4A7$, равные $d1+2w1+3w0$, поскольку по каждому такому участку должны пройти два проводника. Положение точек X , Y , Z и T на этих схемах аналогично описанному в пояснениях к рис. 2, б. для таких трехрядных схем при $N=25$ ($m=9$ переходов в одном из рядов, $m=8$ в каждом из остальных) получим суммарную площадь 65,6 мм², что лучше и двухрядного, и (тем более!) однорядного размещения переходов, рекомендуемых в [1].

Схемы, приведенные на рис. 5, а и рис. 6, являются четырех- и пятирядными соответствен-

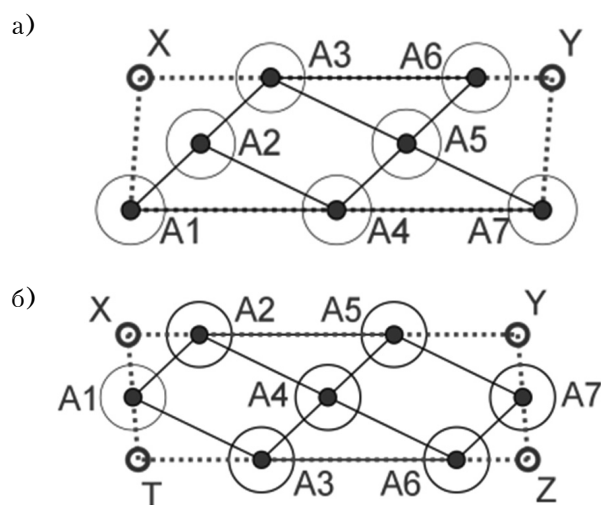


Рис. 4. Варианты трехрядной схемы

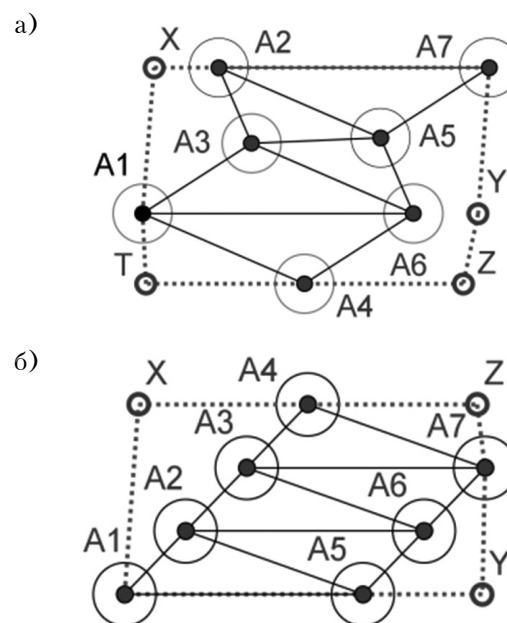


Рис. 5. Варианты четырехрядной схемы

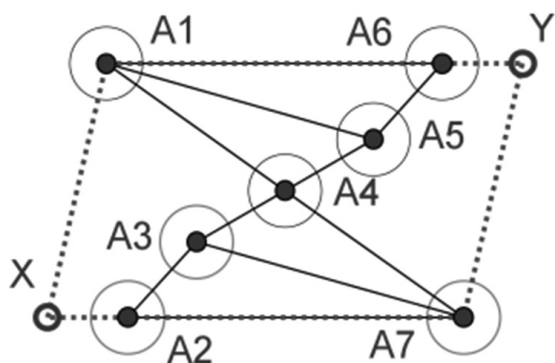


Рис. 6. Пятирядная схема

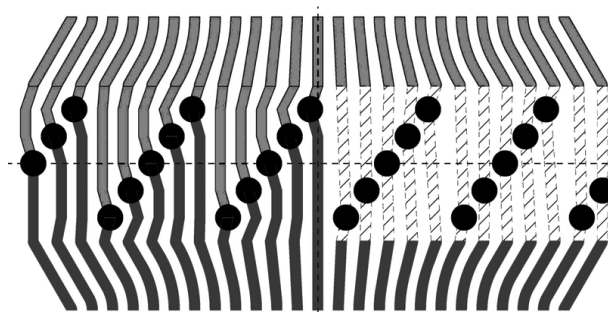


Рис. 7. Пятирядная схема с $N=25$ переходов

но. Здесь расстояния между рядами неодинаковы, а на рис. 6 один из рядов даже не является горизонтальным. Как и на предыдущих схемах, на этих рисунках сплошными линиями показаны критичные отрезки, длина которых рассчитана так, чтобы через них смогло пройти нужное число проводников шириной w_1 с минимально допустимыми зазорами w_0 .

Точный расчет параметров таких схем не очень прост, но, к счастью, он и не нужен, поскольку очевидно, что регулярная схема более проста и дает лучший результат. Наглядным примером этому может служить регулярная четырехрядная схема, которая приведена на рис. 5, б, имеющая ту же длину L_2 , что и на рис. 5, а, но меньшую высоту. С помощью не очень сложных вычислений (они довольно громоздки и в настоящей статье не приведены) можно убедиться, что сделанный вывод о преимуществе регулярных схем справедлив для любых соотношений величин w_0 , w_1 и d (в тех диапазонах их значений, которые используются на практике). Тем более, он не зависит от N — каждая такая картинка легко продолжается вправо и влево, т. е. каждая схема обобщается для любого числа проводников.

Таким образом, ограничим вычисления только регулярными многорядными расположениями, в которых соседние переходные отверстия расположены в соседних рядах. Наиболее реалистичное изображение 25 переходов, сгруппированных в 5 регулярных рядов по 5 переходов в каждом ряду, показано на **рис. 7**. Правая часть прямоугольника на схеме содержит на один переход меньше, чем левая, поэтому изображена лишь схематично — поскольку в левой части удалось разместить все необходимое, то и справа это тоже удастся.

Результаты, приведенные в табл. 3, показывают, что для $N=25$ и выбранных значений w_0 , w_1 , d наилучшей будет четырехрядная схема (с числом переходов в рядах $m_1=m_2=m_4=6$ и $m_3=7$).

Площадь монтажного пространства для такой схемы равна $57,43 \text{ мм}^2$, что на $33,62 \text{ мм}^2$ меньше, чем при однорядном размещении. Следует отметить, что такой выигрыш по площади может показаться незначительным, однако на платах с высокой плотностью монтажа даже небольшое добавление ресурса на конкретном участке может иметь решающее значение. Так, разделив полученную разницу $33,62 \text{ мм}^2$ на ширину шины $9,8 \text{ мм}$ (25 проводников шириной $0,2 \text{ мм}$ и 24 зазора по $0,2 \text{ мм}$), получим ширину эквивалентного прямоугольника, равную $3,43 \text{ мм}$. Через зону такой ширины можно провести 8 проводников шириной $0,2 \text{ мм}$ с зазором $0,2 \text{ мм}$.

Итак, для рассмотренного примера оптимальная многорядная схема лучше однорядной на 37%, а двухрядной — на 18%.

Таким образом, на основании проведенного анализа можно утверждать, что для непересекающихся проводников при однорядном и двухрядном размещении переходов монтажное пространство используется нерационально, и для конкретных параметров размещения можно найти оптимальное число рядов, при котором суммарная площадь монтажного пространства в случае регулярного размещения переходов будет минимальной.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Pfeil Ch. Revolutionary new routing method // Presentation at the «PCB West 2013» Conf. — Santa-Clara, CA, USA, 2013.
2. Бессонов А. В., Кноп К. А., Лячек Ю. Т. Определение относительного расположения переходных отверстий на группе проводников, пересекающихся в паре слоев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2014. — № 10. — С. 21–25.
3. Бессонов А. В., Кноп К. А., Лячек Ю. Т., Попов Ю. И. Определение минимальной ширины канала между парой компонентов при топологической трассировке // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2013. — № 10. — С. 31–34.

Дата поступления рукописи
в редакцию 16.04 2015 г.

К. А. КНОП, д. т. н. С. Ю. ЛУЗИН
Росія, м. Санкт-Петербург, ТОВ «Эремекс»
E-mail: luzin@eremex.com

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗТАШУВАННЯ МІЖШАРОВИХ ПЕРЕХОДІВ НА ГРУПІ ПРОВІДНИКІВ

Більшість САПР друкованих плат пропонують досить обмежений вибір «шаблонів» для розміщення міжшарових переходів на шині (групі провідників) — тільки однорядний і дворядний варіанти. У статті продемонстрована некоректність такого обмеження, оскільки в цьому разі ресурси монтажного простору використовуються неоптимально. Для певного класу задач про розташування перехідних отворів при зміні шару шини знайдено та наведено оптимальне рішення — воно також виявилось регулярним (періодичним), але багаторядним. Показано, що задача обчислення параметрів оптимального розміщення в загальному вигляді зводиться до знаходження числа рядів переходів, при якому площа топологічного фрагмента буде мінімальною.

Ключові слова: друкований монтаж, міжшаровий перехід, група провідників.

DOI: 10.15222/TKEA2015.2-3.10
UDC 681.32

К. А. КНОП, С. Ю. ЛУЗИН
Russia, Saint-Petersburg, «Eremex» Ltd.
E-mail: luzin@eremex.com

VIA PLACEMENT OPTIMIZATION FOR A GROUP OF WIRES

Most PCB design CAD systems offer a limited number of “patterns” for the via placement on a bus (group of wires) which would be either a single- or a double-row placement.

This article demonstrates the incorrectness of such limitations, because in this case the mounting space is used not in an optimal way.

The paper presents the optimum solution for a certain type of problems on via placement when changing the layer of a bus. The solution suggests a regular (periodic) arrangement, but with a multi-row placement.

The calculation of the parameters for optimal placement is narrowed, in general, to finding the number of via rows with which the area of a topological fragment is minimal.

Key words: printed wiring, via, group of wires.

REFERENCES

1. Pfeil Ch. Revolutionary new routing method. Presentation at the «PCB West 2013» Conf. Santa-Clara, CA, USA, 2013.
2. Bessonov A. V., Knop K. A., Lyachek Yu. T. [Determination of the relative positions of vias on a group

of conductors intersecting in a pair of layers]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*. 2014, no. 10, pp. 21–25. (Rus)

3. Bessonov A. V., Knop K. A., Lyachek Yu. T., Popov Yu. I. The determination of minimum distance between two components in the topological routing. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2013, no. 10, pp. 31-34. (Rus)

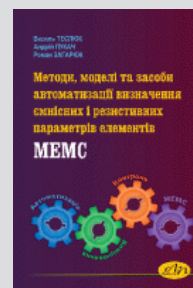
НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Теслюк В. М., Пукач А. І., Загарю Р. В. Методи, моделі та засоби автоматизації визначення ємнісних і резистивних параметрів елементів МЕМС. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

Проаналізовано методи, моделі та засоби визначення електричного опору резистивних параметрів електричних кіл, а також розглянуто резистивні та ємнісні параметри МЕМС та особливості автоматизації визначення їх значення. Наведено розроблені методи для автоматичного визначення електричного опору та ємності резистивних та ємнісних параметрів МЕМС, що враховують особливості та специфіку МЕМС-технологій. Здійснено моделювання роботи розроблених методів та аналіз отриманих результатів.

Для радіоінженерів, науковців і студентів, які спеціалізуються у сфері автоматизації вимірювання та контролю ємнісних і резистивних параметрів мікроелектронних пристроїв та систем.



К. т. н. А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО, к. т. н. А. В. ТРОЯНСКИЙ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

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

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ЛИНЕЙНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ТРЕБУЕМОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ И ЦЕЛОЧИСЛЕННЫМИ АМПЛИТУДНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

Предложен алгоритм синтеза эквидистантных линейных решеток с действительными амплитудными коэффициентами и ограниченным набором фазовых коэффициентов, а также модификация данного алгоритма для случая целочисленных значений затухания аттенюаторов антенной решетки. В основе алгоритма лежит дискретное Фурье-преобразование функции, описывающей требуемую диаграмму направленности решетки.

Ключевые слова: диаграмма направленности, дискретное преобразование Фурье, фазированная антенная решетка, управляемые аттенюаторы, фазовращатели.

Резкий скачок в развитии малогабаритных систем связи с подвижными объектами привел к ужесточению требований к массогабаритным и техническим показателям антенных устройств. Реализация заданной функции направленности антенн при сохранении высокого коэффициента направленного действия совместно с задачей их миниатюризации и технологичности представляет собой довольно сложную проблему как в теоретическом, так и в практическом плане [1].

Основной проблемой синтеза антенных решеток (АР) по требуемой диаграмме направленности (ДН) является комплексное представление амплитудно-фазового распределения поля вдоль решетки, которое приводит к сложности технической реализации аттенюаторов и фазовращателей. Целью настоящей работы является разработка алгоритма синтеза антенной решетки с дискретными элементами при аппроксимации комплексного амплитудно-фазового распределения поля вещественным.

Синтез АР по заданной функции направленности в общем случае сводится к нахождению массива амплитудных и фазовых коэффициентов [2, 3]. При этом точность аппроксимации диаграммы направленности существенно зависит от длины решетки или от числа облучателей в заданной плоскости.

Типовая структурная схема АР приведена на рис. 1. Схема содержит набор постоянных калиброванных аттенюаторов $A_1 \dots A_n$ и фазовращателей $\Phi_1 \dots \Phi_n$, которые коммутируются при помощи многопозиционного переключателя.

В зависимости от требований к скорости перестройки ДН и точности ее формирования аттенюаторы с электронным управлением могут быть реализованы в одном из двух вариантов:

— с непрерывной регулировкой, когда используется сопротивление $p-n$ -перехода СВЧ-транзистора либо диода, которое зависит от напряжения смещения;

— с дискретной регулировкой, когда используются отрезки линии передачи с калиброванным затуханием, а требуемое значение затухания получается при соответствующей коммутации этих отрезков при помощи выключателей на основе $p-i-n$ -диодов [5, с. 26].

Фазовращатели, как и аттенюаторы, также бывают с плавной зависимостью фазового сдвига от управляющего напряжения (выполняются с применением ферритов) и дискретные, с заранее калиброванными параметрами. При этом следует отметить, что температурные параметры и временная стабильность дискретных аттенюаторов и фазовращателей лучше, чем элементов с плавной характеристикой.

Синтез антенной решетки в зависимости от заданной диаграммы направленности реализуется блоком управления ДН. Известно, что ам-

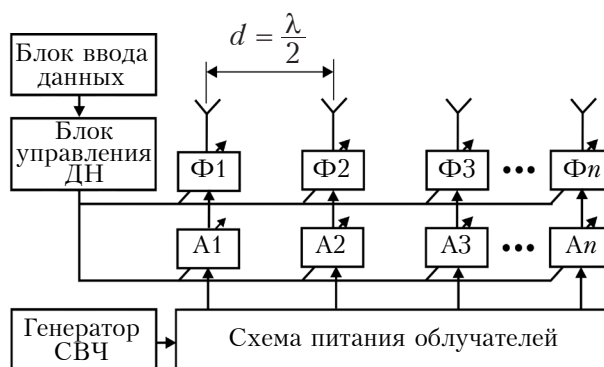


Рис. 1. Структурная схема линейной антенной решетки [4, с. 88]

плитудное распределение поля в раскрыве антенной решетки и диаграмма направленности связаны преобразованием Фурье. То есть амплитудные и фазовые коэффициенты вычисляются с помощью преобразования Фурье, а затем обрабатываются в зависимости от выбранной схемной реализации аттенюаторов и фазовращателей. Вычисление обратного преобразования Фурье для модифицированных коэффициентов позволяет вычислить синтезированную функцию направленности.

При разработке алгоритма поиска амплитудных и фазовых коэффициентов необходимо учесть тот факт, что целочисленные значения затухания технически легче реализовать, чем дробные.

Исходные данные для проведения синтеза решетки — рабочая частота f , дискретная либо непрерывная функция направленности $F(\Theta_i)$, $i = 0, N-1$, допустимая величина среднеквадратического отклонения ε .

Алгоритм синтеза эквидистантной линейной решетки с шагом расположения излучателей, равным $\lambda/2$ (где λ — рабочая длина волны), имеет следующий вид.

Шаг 1. Определяем число излучателей решетки: $N = \text{Int}(90^\circ / \Delta\varphi)$, где $\Delta\varphi$ — фазовый сдвиг между полями излучателей.

Шаг 2. Если функция $F(\Theta)$ задана в непрерывной форме, разбиваем ее на N отсчетов.

Шаг 3. Находим прямое дискретное преобразование Фурье $F(\Theta)$:

$$C(k) = \sum_{i=0}^{N-1} F(\Theta_i) \exp\left(-j \frac{2\pi i k}{N}\right), k = \overline{0, N-1}.$$

Шаг 4. Находим амплитудные коэффициенты по формуле

$$A(k) = \sqrt{\text{Re}\{C(k)\}^2 + \text{Im}\{C(k)\}^2}.$$

Шаг 5. Округляем амплитудные коэффициенты до ближайшего целого числа:

$$A'(k) = \text{Int}[A(k)].$$

Шаг 6. Присваиваем всем четным фазовым коэффициентам фазу, равную π радиан:

$$B(2i) = \pi, i = \overline{0, (N-1)/2} \text{ или } i = \overline{1, N/2}.$$

Шаг 7. Присваиваем всем нечетным фазовым коэффициентам фазу, равную 0 радиан:

$$B(2i+1) = 0, i = \overline{1, (N-1)/2} \text{ или } i = \overline{1, N/2}.$$

Шаг 8. Находим модифицированные коэффициенты Фурье:

$$C(k) = \text{Re}[A(k) \cdot \exp(j \cdot B(k))] + j \cdot \text{Im}[A(k) \cdot \exp(j \cdot B(k))].$$

Шаг 9. Вычисляем обратное дискретное преобразование Фурье:

$$F'(\Theta_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} C(k) \exp\left(j \frac{2\pi i k}{N}\right), i = \overline{0, N-1}.$$

Шаг 10. Вычисляем среднеквадратическое отклонение между $F(\Theta)$ и $F'(\Theta)$:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} (F(\Theta_i) - F'(\Theta_i))^2}{\sum_{i=0}^{N-1} F^2(\Theta_i)}}$$

Шаг 11. Выполняем проверку $\delta \leq \varepsilon$: если да, то синтез закончен; если нет, то увеличиваем число излучателей $N = N+1$ и переходим к шагу 2.

Рассмотрим конкретный пример.

Пусть требуется синтезировать печатную антенную решетку с функцией направленности вида

$$F(\Theta) = \begin{cases} 1 & \text{при } -4^\circ < \Theta < 4^\circ; \\ 0 & \text{при } |\Theta| > 4^\circ \end{cases}$$

при фазовом сдвиге $\Delta\varphi = 1^\circ$.

Определим число излучателей решетки: $N = \text{Int}(90^\circ / \Delta\varphi) = 90$. Поскольку функция $F(\Theta)$ задана в непрерывной форме, произведем ее разбиение на 90 отсчетов. После выполнения шагов 3, 4 и 5 приведенного выше алгоритма получим амплитудные коэффициенты. Фазовый спектр коэффициентов зададим в соответствии с шагами 6 и 7.

На рис. 2 изображены точные (A_{mt}) и округленные (A_{mp}) значения полученных амплитудных коэффициентов в зависимости от нормиро-

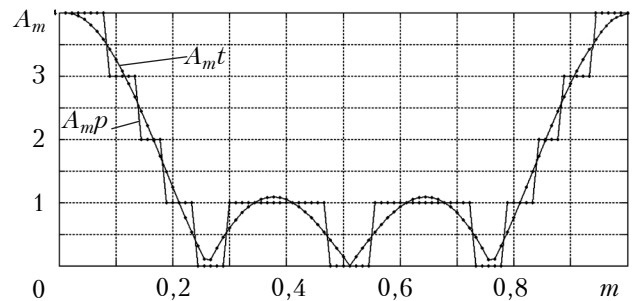


Рис. 2. Точные значения амплитудных коэффициентов (A_{mt}) и их значения после округления (A_{mp}) в зависимости от нормированной длины антенной решетки m

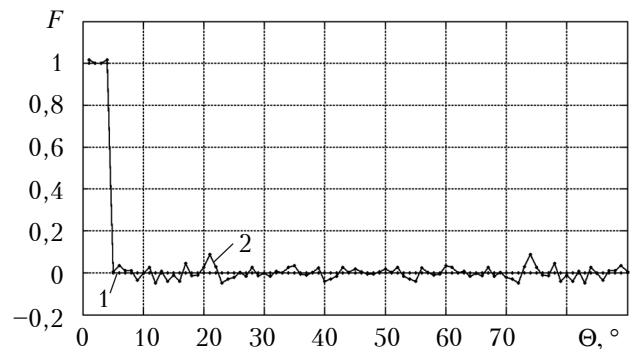


Рис. 3. Заданная (1) и синтезированная (2) диаграммы направленности

ванной длины m антенной решетки, т. е. приведено амплитудное распределение поля в решетке.

Значение m вычислялось по формуле

$$m = \frac{l}{N \frac{\lambda}{2}},$$

где l — фактическая длина решетки.

Результаты, полученные после выполнения обратного дискретного преобразования Фурье, представлены на **рис. 3**.

Анализ рис. 3 показывает достаточно хорошее совпадение заданной и синтезированной диаграмм направленности в районе основного лепестка и возросший уровень боковых лепестков полученной диаграммы, что можно отнести к ее недостаткам. Относительный уровень боковых лепестков в данном случае составляет $\xi = 20 \lg 0,08 = -21,9$ дБ, а среднеквадратическое отклонение $\delta = 0,15$.

Заключение

Разработанный алгоритм синтеза линейных антенных решеток с целочисленными амплитудными и бинарными фазовыми коэффициентами, который основан на использовании быстрого дискретного преобразования Фурье, позволяет обеспечить заданное среднеквадрати-

ческое отклонение от исходной диаграммы направленности. При этом исходная функция направленности может быть задана как аналитическим выражением, так и в дискретной форме. Предложенный алгоритм также можно с успехом применить для расчета коэффициентов, определяющих диаграмму направленности антенны, что особенно важно в связи с появлением управляемых фазовращателей и аттенюаторов в интегральном исполнении.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Зелкин Е. Г., Соколов В. Г. Методы синтеза антенн: Фазированные антенные решетки и антенны с непрерывным раскрытием. — Москва: Сов. радио, 1980.
2. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиотехнических приложениях / Под ред. В. Ф. Кравченко. — Москва: Физматлит, 2011.
3. Зелкин Е. Г., Кравченко В. Ф., Гусевский В. И. Конструктивные методы аппроксимации в теории антенн. — Москва: Сайнс-Пресс, 2005.
4. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. Д. И. Воскресенского. — Москва: Радио и связь, 2012.
5. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д. И. Воскресенского, А. И. Канащенкова. — Москва: Радиотехника, 2004.

Дата поступления рукописи
в редакцию 28.01 2015 г.

А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО, О. В. ТРОЯНСКИЙ

Україна, Одеський національний політехнічний університет

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

АЛГОРИТМ СИНТЕЗУ ЛІНІЙНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК З НЕОБХІДНОЮ ДІАГРАМОЮ СПРЯМОВАНOSTІ І ЦІЛОЧИСЛОВИМИ АМПЛІТУДНИМИ КОЕФІЦІЄНТАМИ

Запропоновано алгоритм синтезу еквідистантних лінійних решіток з дійсними амплітудними коефіцієнтами і обмеженим набором фазових коефіцієнтів, а також модифікацію даного алгоритму для випадку цілочислових значень згасання аттенюаторів антенної решітки. В основі алгоритму лежить дискретне Фур'є-перетворення функції, яка описує необхідну діаграму спрямованості решітки.

Ключові слова: діаграма спрямованості, дискретне перетворення Фур'є, фазована антенна решітка, керувані аттенюатори, фазообертачі.

DOI: 10.15222/TKEA2015.2-3.15
UDC 621.396.677.49

A. V. SADCHENKO, O. A. KUSHNIRENKO, A. V. TROYANSKY

Ukraine, Odessa National Polytechnic University

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

ALGORITHM FOR THE SYNTHESIS OF LINEAR ANTENNA ARRAYS WITH DESIRED RADIATION PATTERN AND INTEGRAL AMPLITUDE COEFFICIENTS

The problem of technical implementation of phased array antennas (PAR) with the required radiation pattern (RP) is the complexity of the construction of the beamforming device that consists of a set of controlled attenuators and phase shifters. It is possible to simplify the technical implementation of PAR, if complex representation of coefficients of amplitude-phase distribution of the field along the lattice is approximated by real values in the synthesis stage.

It is known that the amplitude distribution of the field in the aperture of the antenna array and the radiation pattern are associated with Fourier transform. Thus, the amplitude and phase coefficients are first calculated using the Fourier transform, and then processed according to the selected type of circuit realization of attenuators and phase shifters. The calculation of the inverse Fourier transform of the modified coefficients allows calculating the synthesized orientation function.

This study aims to develop a search algorithm for amplitude and phase coefficients, taking into account the fact that integer-valued amplitudes and phases are technically easier to implement than real ones.

Synthesis algorithm for equidistant linear array with a half-wavelength irradiators pitch ($\lambda/2$) is as follows.

From a given directivity function the discrete Fourier transform (DFT) in the form of an array of complex numbers is found, the resulting array is then transformed into a set of attenuations for attenuators and phase shifts for phase shifters, while the amplitude coefficients are rounded off to integers, and phases are binarized (0, π).

The practical value of this algorithm is particularly high when using controlled phase shifters and attenuators integrally.

The work confirms the possibility of a thermoelectric converter of human body application for an electronic medical thermometer power supply.

Keywords: radiation pattern, the discrete Fourier transform, phased array antenna, controlled attenuators, phase shifters.

REFERENCES

1. Zelkin E.G., Sokolov V.G. [Methods of synthesis of antennas. Phased arrays and antennas with continuous aperture] *Metody sinteza antenn: Fazirovannyye antennnye reshetki i anteny s nepreryvnym raskryvom*. Moscow, Sovetskoe radio, 1980, 296 p. (Rus)
2. *Tsifrovaya obrabotka signalov i izobrazhenii v radiofizicheskikh prilozheniyakh* [Digital signal and image processing applications in radiophysical] Ed. by V. F. Kravchenko, Moscow, Fizmatlit, 2011, 544 p. (Rus)
3. Zelkin E.G., Kravchenko V.F., Gusevskii V.I. [Constructive methods of approximation in the theory of antennas] *Konstruktivnye metody approksimatsii v teorii antenn*, Moscow, Sains-Press, 2005, 512 p. (Rus)
4. *Ustroystva SVCh i anteny. Proektirovaniye fazirovannykh antennnykh reshyotok* [Microwave devices and antennas. The design of phased antenna arrays]. Ed. by D.I. Voskresenskii. Moscow, Radio i svyaz', 2012, 746 p. (Rus)
5. *Aktivnyye fazirovannyye antennnye reshetki* [Active phased arrays]. Ed. by D.I. Voskresenskii, A.I. Kanashchenkov, Moscow, Radiotekhnika, 2004, 488 p. (Rus)

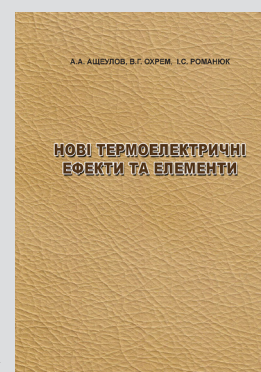
НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Ащеулов А. А., Охрем В. Г., Романюк И. С. Новые термоэлектрические эффекты и элементы (на украинском языке).— Черновцы: Издательский дом «Родовід», 2015.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований некоторых новых физических явлений и эффектов в термоэлектрически неоднородных и анизотропных средах. К ним относятся такие как Umkehr-эффект, а также явления объемной термо-эдс и Бриджмена. Их использование позволило предложить и создать ряд оригинальных холодильных элементов. Рассмотрены также новые аспекты явления вихревых термоэлектрических токов, позволившие предложить оригинальный подход к проблеме термоэлектрического преобразования энергии. Полученные результаты обусловили появление ряда перспективных генераторных и холодильных элементов.

Для ученых, занимающихся термоэлектричеством, инженеров-разработчиков термоэлектрических приборов, а также для преподавателей, аспирантов и студентов соответствующих специальностей.



К. т. н. С. М. ХАЙРНАСОВ

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»
E-mail: Sergey.Khairnasov@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ В СИСТЕМАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РЭА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Существенную роль в решении задачи обеспечения тепловых режимов функционирования радиоэлектронной аппаратуры сыграло внедрение эффективных теплопередающих и теплообменных систем на основе тепловых труб. В настоящее время можно выделить следующие направления использования тепловых труб: электронная аппаратура, компьютерная техника различного назначения, силовая электроника. В статье приводится анализ современного состояния и перспектив использования тепловых труб в системах обеспечения тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры наземного применения.

Ключевые слова: тепловая труба, термосифон, РЭА, компьютерная техника, система охлаждения.

Проблема обеспечения тепловых режимов электронной и радиоэлектронной аппаратуры (**РЭА**) наземного применения является актуальной, что в первую очередь связано с достаточно узким температурным диапазоном ее функционирования, в котором обеспечиваются ее номинальные характеристики. В современных компьютерных центрах около половины всей потребляемой энергии приходится на холодильные и компрессорные установки, т. е. очевидно, что в этом случае внедрение ресурсосберегающих систем охлаждения является весьма выгодным и актуальным [1]. Кроме того, в последнее время проблема обеспечения температурного режима РЭА усугубляется тем, что новые технологии позволяют изготавливать радиоэлектронные компоненты малых размеров, что наряду с их высоким тепловыделением приводит к усложнению задачи обеспечения тепловых режимов (например, при площади ядра процессора AMD Trinity 246 мм² тепловой поток может достигать 100 Вт, а в некоторых конструкциях современных процессоров — 300 Вт).

Для поддержания нужного температурного режима РЭА существует ряд конструкторских решений, в которых используются радиаторы, вентиляторы, жидкостные системы охлаждения. Однако для целого ряда задач наиболее эффективным является использование активных и пассивных систем обеспечения тепловых режимов на основе двухфазных теплотранспортных систем — тепловых труб [2].

В настоящее время использование тепловых труб (**ТТ**) в системах обеспечения теплового режима (**СОТР**) РЭА достаточно широко распространено [3, 4]. Применению ТТ в РЭА было посвящено много работ еще в 1970-х годах, но

массовое использование ТТ в электронной индустрии, включая компьютерную, началось в начале 2000-х годов. Так, сегодня практически все конструкции ноутбуков включают системы охлаждения на основе ТТ. Тепловые трубы используются в узлах и блоках РЭА с элементами повышенной мощности. Они могут использоваться для отвода тепла как от единичного электронного элемента, так и от группы электронных элементов.

Существует огромное количество публикаций, в которых авторы описывают различные технические решения СОТР на основе ТТ, а также конструкции самих ТТ. Однако следует отметить недостаточность публикаций, обобщающих вопросы применения ТТ в РЭА. В настоящей работе рассмотрены разнообразные технические решения современных СОТР с применением ТТ, проведены обобщение и анализ, которые могут составить базу для выбора ТТ и проектирования перспективных конструкций РЭА специалистами.

Классификация тепловых труб

Любое техническое решение современной РЭА базируется на конструктивных особенностях, определяющих компактность, низкие энергопотребление и массу, а также снижение стоимости изделия. В связи с этим, выбор конструктором СОТР без ТТ либо с ТТ имеет одно из решающих значений. При этом также важным является вопрос выбора типа самой ТТ. При создании РЭА конструктору необходимо знать не только принципы функционирования различных типов ТТ, но и, что более важно, их функциональные ограничения, а также необходимые и

достаточные условия, определяющие стабильную работу ТТ. Таким образом, понимание процессов, происходящих в ТТ различных конструкций, является первичным вопросом при создании конструкции СОТР на их основе.

Существуют различные подходы к классификации ТТ, что вызвано появлением всё новых конструктивных решений ТТ. Для общего по-

нимания разновидностей и места ТТ в двухфазных теплотранспортных системах предлагается рассмотреть классификацию по принципу их функционирования, приведенную на **рис. 1**. За ее основу взята классификация из европейского стандарта, включающего требования к ТТ для космической техники [5], но в нее дополнительно включены пульсационные ТТ, термосифоны и

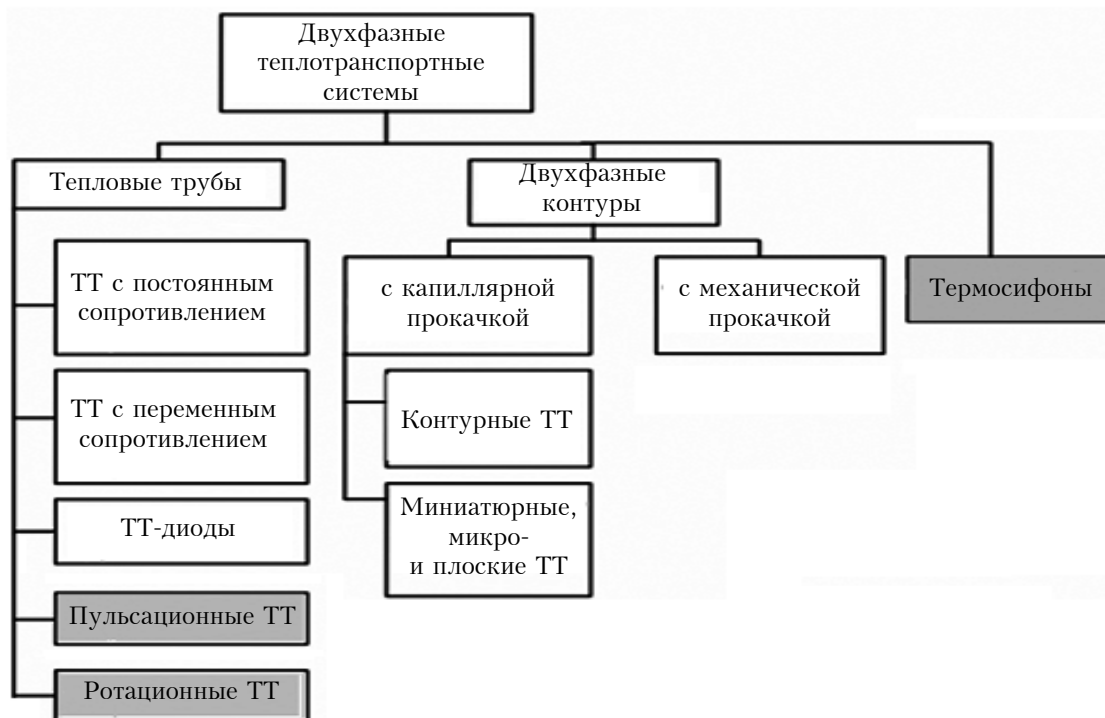


Рис. 1. Классификация двухфазных теплотранспортных систем наземного назначения [5]

Таблица 1

Характеристики тепловых труб различных типов

Тип ТТ	Принцип функционирования (сила, движущая жидкую фазу теплоносителя)	Преимущества	Недостатки
Обычные термосифоны	Гравитационные силы	Простота конструкции, низкая стоимость, надежность	Не работают против сил тяжести
Миниатюрные, микро- и плоские термосифоны		Простота конструкции, малые габариты, надежность	Низкие теплопередающие характеристики; не работают против сил тяжести
Обычные ТТ	Капиллярные силы	Надежность, могут работать против сил тяжести	Средняя стоимость
Миниатюрные, микро- и плоские ТТ		Малые габариты, могут работать против сил тяжести	Низкие теплопередающие характеристики
Контурные ТТ	Перепад давлений между испаряющей и впитывающей поверхностями капиллярного насоса	Работают при любой ориентации в пространстве, позволяют создать гибкую конструкцию	Высокая стоимость
Пульсационные ТТ	Переменные (пульсационные) процессы испарения и конденсации теплоносителя в «петлях» ТТ	Простота конструкции, низкая стоимость	Нестабильность работы, недостаточно изучены

ротационные ТТ, которые сегодня успешно применяются в СОТР РЭА наземного назначения.

В данной работе проведен анализ имеющейся информации о ТТ с постоянным термическим сопротивлением, термосифонов, контурных и пульсационных ТТ, а также модификаций ТТ с постоянным термическим сопротивлением и термосифонов малых габаритов — микро- и миниатюрных ТТ (диаметром 6 мм и меньше), паровых камер и плоских ТТ (высотой 6 мм и меньше), гибких ТТ, которые являются на сегодняшний день актуальными для применения в малогабаритной РЭА. В табл. 1 приведена информация об особенностях рассматриваемых типов ТТ.

Следует отметить, что ТТ с постоянным и переменным термическим сопротивлением, а также тепловые трубы-диоды могут выполняться с капиллярной структурой (КС) различного типа: порошковой, сетчатой, металловолоконистой и канавчатой (рис. 2). В табл. 2 приведены рабочие характеристики (максимальный передаваемый тепловой поток Q_{\max} и термическое сопротивление R_{tt}), а также стоимостные показатели ТТ идентичной конструкции с КС различного типа [5]. Здесь не приведены данные по ТТ с металловолоконистой КС, термическое сопротивление и стоимостные показатели которых приблизительно такие же, как и у ТТ с порошковой КС, но при этом они более эффективны при работе против силы тяжести.

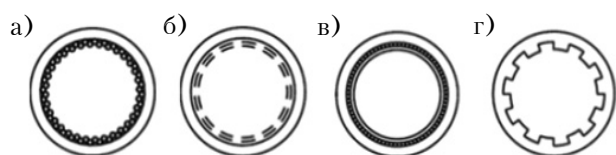


Рис. 2. Сечения ТТ с различными капиллярными структурами:

а — порошковая; б — сетчатая; в — металловолоконистая; г — канавчатая (конструкционная)

Таблица 2

Сравнение рабочих характеристик медных ТТ, направленных водой, с постоянным термическим сопротивлением и КС разного типа [6]

Тип КС	Q_{\max} , Вт	R_{tt} , К/Вт	Стоимость 1 шт./от 100 шт., евро
Длина ТТ 200 мм, диаметр 8 мм			
Порошковая	61	0,1–0,2	15,56/5,67
Сетчатая	50	0,05–0,01	13,33/4,70
Канавчатая	55	0,05–0,01	12,88/4,47
Длина ТТ 400 мм, диаметр 6 мм			
Порошковая	40	0,15–0,2	15,00/5,37
Сетчатая	45	0,05–0,01	14,39/5,14
Канавчатая	45	0,05–0,01	13,77/4,92

Таким образом, можно заключить, что из четырех типов КС канавчатая наиболее привлекательна, но только для условий горизонтального расположения ТТ или при работе в режиме термосифона. ТТ с канавчатой КС, как и гладкостенные термосифоны, нельзя применять в тех случаях, когда зона подвода тепла располагается над зоной теплоотвода (т. е. при работе против силы тяжести).

Системы обеспечения тепловых режимов РЭА на основе ТТ

Тепловые трубы эффективно использовать в СОТР РЭА в тех случаях, когда:

- источник теплоты (электронный элемент или группа электронных элементов) находится на расстоянии от места, где необходимо обеспечить отвод тепла;
- необходимо повысить компактность и снизить массо-энергетические характеристики СОТР и всего изделия.

Можно выделить два типа конструкций СОТР с ТТ по способу размещения элементов РЭА [3, 7]:

- непосредственно на поверхности ТТ (схемным решением тут может быть использование теплопроводного электроизолирующего слоя между ТТ и электронным элементом, а конструктивной реализацией — использование обычной теплопроводной пасты или компаундов типа КПТ-8, КТЭ-2 и др.);
- на корпусах ТТ через теплопроводные конструктивные элементы (такая компоновка часто используется, если сечение корпуса ТТ имеет круглую форму, при этом применяются металлические пластинчатые теплопереходы).

В качестве элементов СОТР РЭА используются различные типы ТТ, но обычно малых габаритов: микро- и миниатюрные ТТ, паровые камеры, плоские ТТ, гибкие ТТ, круглые ТТ с различными типами КС, контурные ТТ и пульсационные ТТ.

Различный вид может иметь и сборка РЭА с использованием ТТ. Одними из основных факторов, влияющих на конструкцию, являются:

- взаимное расположение тепловыделяющих элементов и зоны отвода теплоты в окружающую среду;
- максимальная тепловая мощность, которая выделяется элементами РЭА;
- максимальная и минимальная температура рабочих элементов РЭА;
- условия эксплуатации РЭА.

Рассмотрим варианты компоновки СОТР современных РЭА, использующих ТТ, на основе информации одного из лидеров разработки и внедрения ТТ в системах охлаждения РЭА — компании FURUKAWA [8]. На рис. 3 приведены основные схемные решения использования ТТ в компьютерной технике класса лэптоп (laptop).

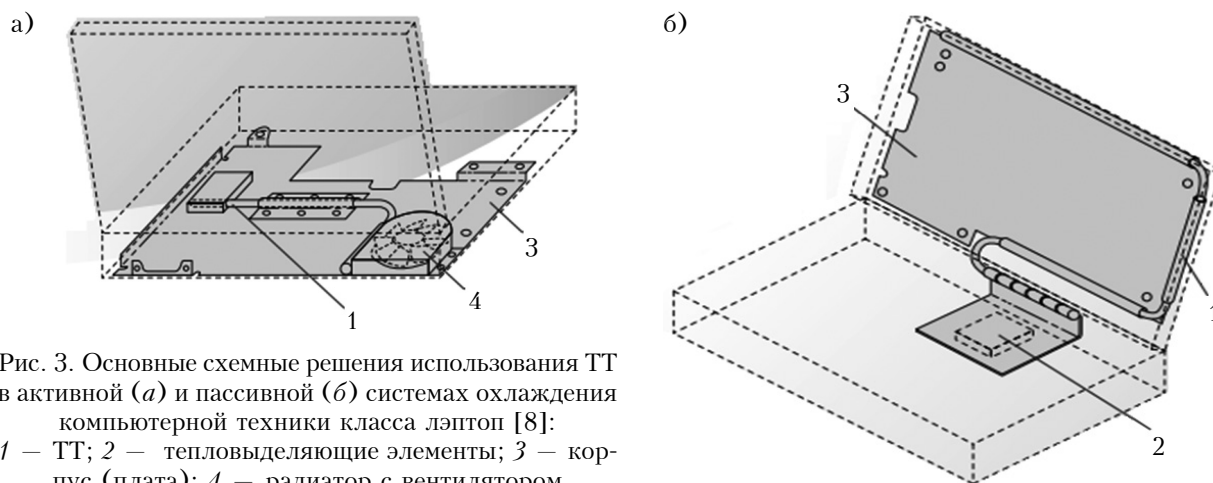


Рис. 3. Основные схемные решения использования ТТ в активной (а) и пассивной (б) системах охлаждения компьютерной техники класса лэптоп [8]: 1 — ТТ; 2 — тепловыделяющие элементы; 3 — корпус (плата); 4 — радиатор с вентилятором

Следует отметить, что в РЭА при использовании ТТ повышается эффективность и активной, и пассивной систем охлаждения. Так, в компьютерных системах класса лэптоп чаще всего реализуется подход повышения эффективности активной системы охлаждения (рис. 3, а). В этом случае использование ТТ позволяет улучшить компоновку и уменьшить массогабаритные характеристики изделия, повысить отводимый от изделия тепловой поток, уменьшить стоимость

изделия. Перспективным является и создание пассивных систем охлаждения. В этом случае в качестве радиатора может быть использована специальная радиаторная плата или же корпус изделия, например тыльная сторона корпуса экрана компьютера, а ТТ являются элементами для транспорта теплоты от процессоров к корпусу (рис. 3, б). При этом обеспечивается, прежде всего, бесшумность, а также надежность, но существует проблема отвода больших тепловых потоков. Поэтому такой подход может использоваться в системах с малым тепловыделением, например не более 10–15 Вт.

Аналогичные подходы реализуются и в СОТР компьютеров класса десктоп (desktop) (рис. 4), для которых ввиду большей, чем у техники класса лэптоп, поверхности корпуса существует также больше возможностей для реализации пассивной системы охлаждения с ТТ. Как пример можно привести корпус Impactics C3LN&K.ISS [11] систем домашних кинотеатров, который кроме двух радиаторов имеет пассивную систему охлаждения с четырьмя медными ТТ. Такая СОТР позволяет обеспечить необходимый температурный режим процессора при его мощности 35 Вт, при этом температура корпуса не превышает 50°C. Габариты корпуса 260 240 8 мм. Для компьютерных процессоров на основе ТТ используются радиаторы, например, Cool Master [9], ZALMAN [10] и многие другие.

Широкое использование ТТ в РЭА не ограничивается только компьютерной техникой. На рис. 5 приведены компоновочные схемы СОТР с ТТ, применяемые в других электронных и радиоэлектронных системах. Здесь, прежде всего, необходимо выделить преимущества и возможности, которые обеспечиваются применением тепловых труб, а именно:

— возможность создания пассивной системы охлаждения (рис. 5, а), когда корпус изделия или специальная радиаторная плата используется как элемент отвода теплоты;

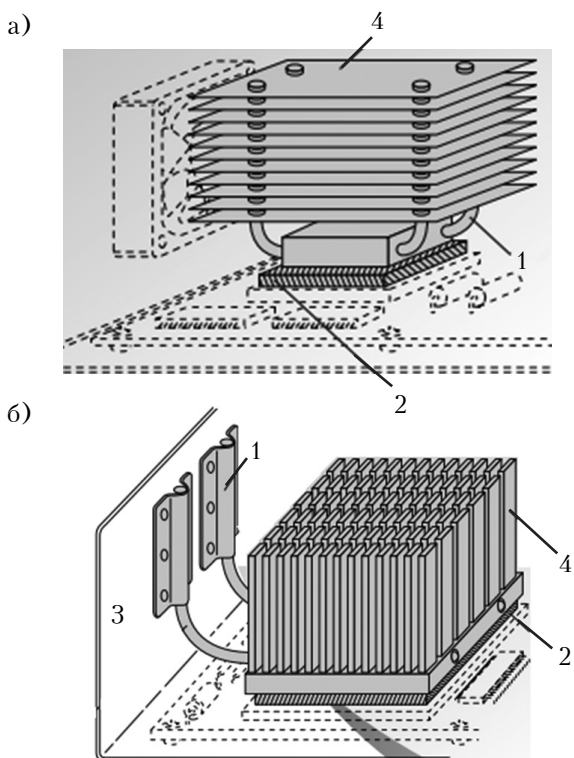


Рис. 4. Основные схемные решения использования ТТ в активной (а) и пассивной (б) системах охлаждения компьютерной техники класса десктоп [8]: 1 — ТТ; 2 — тепловыделяющие элементы; 3 — корпус (плата); 4 — радиатор

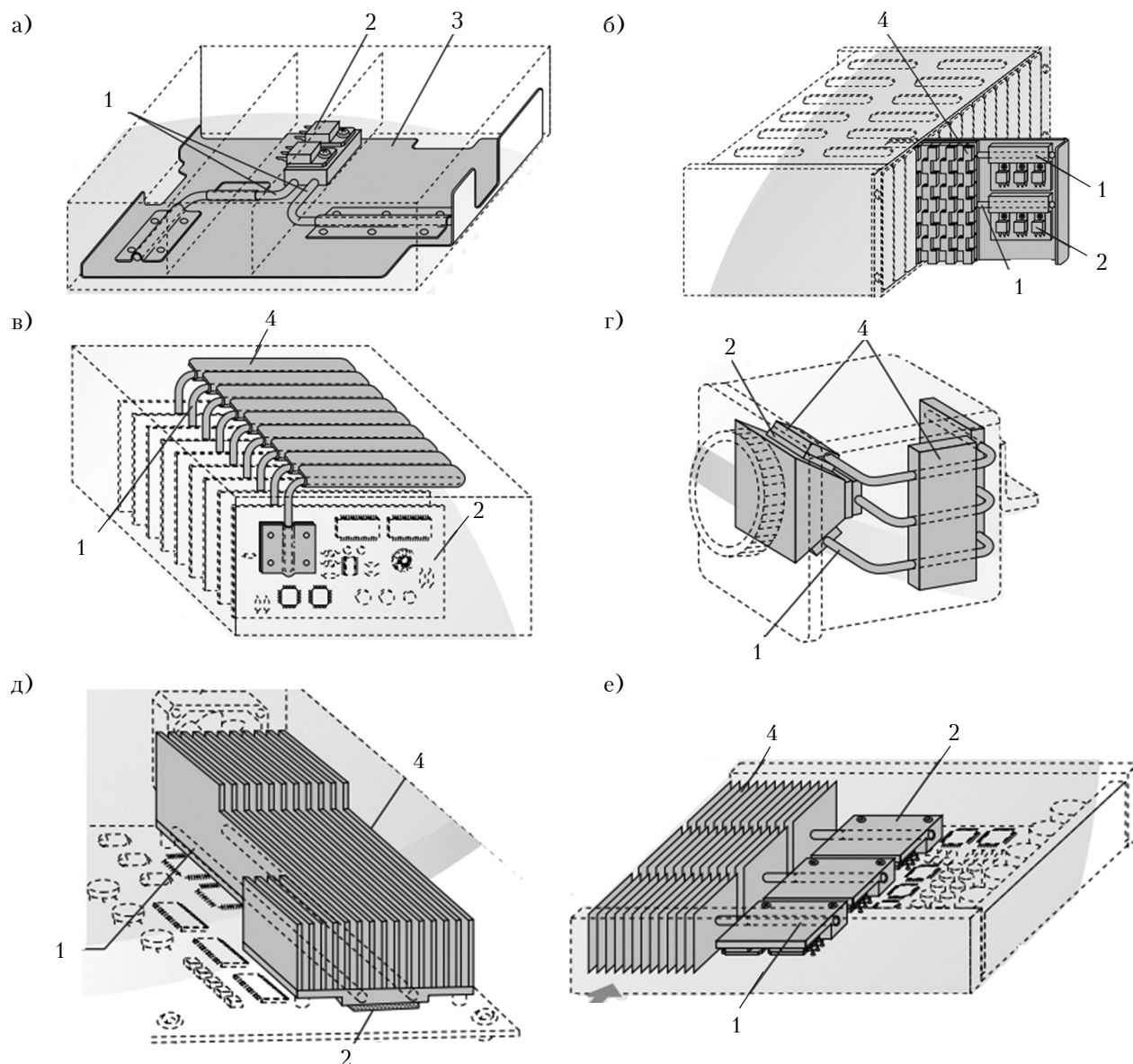


Рис. 5. Основные схемные решения использования ТТ в СОТР различного вида РЭА [8]:

а — телекоммуникационные блоки; *б* — телекоммуникационные конвертеры; *в* — оптоэлектронные устройства; *г* — видеокамеры; *д* — рабочие станции; *е* — серверы
(1 — ТТ; 2 — тепловыделяющие элементы; 3 — корпус (плата); 4 — радиатор)

— благодаря тому, что ТТ позволяют отказаться от дополнительного пространства между платами для циркуляции охлаждающего воздуха, обеспечивается компактность изделия, как это показано на примере телекоммуникационного конвертера на рис. 5, б;

— ТТ позволяют обеспечивать необходимый тепловой режим изделий в тех случаях, когда невозможно использовать активную систему охлаждения, как, например, в оптоэлектронных устройствах и видеокамерах (рис. 5, в, г). Следует заметить, что ТТ часто используются в СОТР РЭА специального назначения (например, для военных целей) и работающих в агрессивной или пожароопасной среде;

— применение ТТ позволяет решить проблему уменьшения шума на больших рабочих станциях и компьютерных центрах (рис. 5, д), позволяя снизить количество вентиляторов активной системы охлаждения и улучшить компоновку электронных блоков рабочих станций.

Однако одним из главных преимуществ использования ТТ является повышение эффективности охлаждения теплонагруженных элементов: благодаря улучшению компоновки элементов изделия, о чем было сказано выше, появляется возможность использования более габаритных, а значит, с намного более развитой поверхностью теплоотвода радиаторов. На рис. 5, е приведен пример построения СОТР процессоров серверов.

Применение тепловых труб

Микро- и миниатюрные тепловые трубы

Микро- и миниатюрные ТТ круглой формы диаметром от 0,3 до 6 мм получили сегодня наибольшее распространение. Их корпус изготавливается из меди, в качестве теплоносителя используется дистиллированная вода, этанол, метанол или ацетон. Они могут изготавливаться с капиллярной структурой различного типа или же без нее (для работы только в режиме термосифона). На **рис. 6** приведены примеры систем охлаждения с медными микро- и миниатюрными ТТ.

Технология изготовления микро- и миниатюрных ТТ из меди широко развита. Существует ряд теоретических моделей, описывающих происходящие внутри таких ТТ процессы. Детальный теоретический анализ процессов в зонах испарения и конденсации микро- и миниатюрных ТТ приведены в [13, 14]. Существует ряд работ, посвященных тепловому анализу СОТР с ТТ для компьютеров. Так, в [15] приведена математическая модель и анализ температурного поля алюминиевого радиатора с двумя и четырьмя встроенными ТТ диаметром 6 мм. Показано, что две ТТ позволяют отводить около 36% общей теплоты от процессора, а четыре ТТ — около 48%. Общее термическое сопротивление всей системы охлаждения процессора равно 0,24°С/Вт. Как продолжение, в [16] описано программное обеспечение на основе разработанной модели для теплового расчета радиаторов со встроенными ТТ. Результат анализа показал, что система охлаждения обладает оптимальными характеристиками при длине тепловых труб 210 мм для двух ТТ и 150 мм для четырех ТТ. В [17] показано, что радиаторы со встроенными ТТ имеют высокую эффективность, а затраты на изготовление серверов и компьютеров невелики в тех случаях, когда необходимо обеспечить отвод большого количества тепла от электронных компонентов при обеспечении их номинальной темпера-

туры 70°С. Типичный пример применения компаний FUJICURA тепловых труб в системах охлаждения ноутбуков и их преимущества описаны в [18].

Наиболее перспективными для медных микро- и миниатюрных ТТ являются конструкции с порошковой или металловолоконистой КС. Так, в [19] показано, что использование КС из медного порошка в три-четыре раза повышает коэффициент теплоотдачи по сравнению с ТТ с канавчатой КС. Например, ТТ с КС на основе медного спеченного порошка (диаметр частиц менее 100 мкм) длиной $l=200$ мм при длине зоны испарения 70 мм, зоны конденсации 85 мм, наружным диаметром $d_n=4$ мм и диаметром парового канала $d_k=2$ мм обеспечивает передачу теплового потока до 50 Вт в горизонтальном положении с водой в качестве теплоносителя [20].

В [17] приведено сравнение эффективности миниатюрных ТТ с порошковой и сетчатой КС, а также с КС в виде жгута из медной проволоки. Так, при равных условиях и при температуре пара 60°С максимальный тепловой поток, передаваемый ТТ с порошковой КС, составлял 35 Вт, с сетчатой КС — 28 Вт, а с КС в виде жгута — 12 Вт. При более высоких значениях потока разница была еще выше.

Также перспективными являются ТТ с металловолоконистой КС, основным преимуществом которой является то, что по сравнению с другими КС она наиболее эффективно обеспечивает работу ТТ против силы тяжести. В [21] приводится информация, что заправленная водой ТТ с медной металловолоконистой КС с пористостью 82% при $l=200$ мм, $d_n=4$ мм, $d_k=2$ мм передает около 5 Вт в случае когда зона подвода тепла расположена выше зоны теплоотвода, при горизонтальном расположении — около 55 Вт, а при расположении зоны подвода тепла ниже зоны теплоотвода — более 90 Вт. При $l=200$ мм, $d_n=6$ мм, $d_k=3$ мм ТТ с медной металловолоконистой КС с пористостью 70%, также заправленная водой, передавала в этих трех поло-

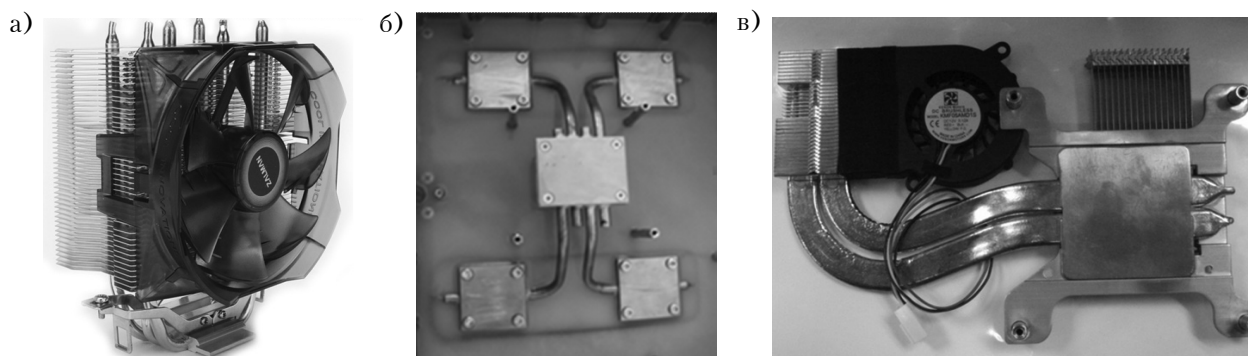
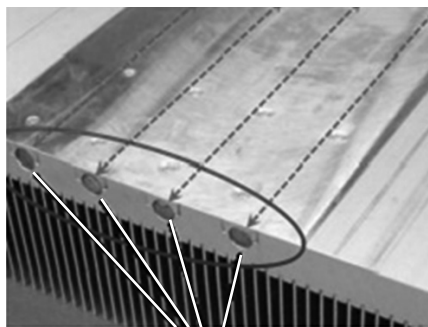


Рис. 6. Системы охлаждения на основе медных микро- и миниатюрных ТТ:

a — активная система охлаждения процессора CNPS8X OPTIMA компании ZALMAN [10] с тремя ТТ для компьютера класса десктоп; *b* — пассивная система охлаждения процессора видеорегистратора с четырьмя ТТ [12]; *в* — активная система охлаждения процессора компьютера класса лэптоп с двумя ТТ (использованы сплюснутые ТТ)



Тепловые трубы

Рис. 7. Радиаторы со встроенными ТТ [22]

жениях, соответственно, 60, 115 и более 250 Вт. Термическое сопротивление такой ТТ равно $1,4 - 1,5$ К/Вт при $d_n = 3$ мм, $0,6 - 0,8$ К/Вт при $d_n = 4$ мм и $0,2 - 0,3$ К/Вт при $d_n = 6$ мм.

В настоящее время крепление ТТ к радиаторам производят через слой теплопроводных паст впаиванием или прижимом. Однако перспективным в этом отношении направлением является создание радиаторов со встроенными ТТ [22], которые могут использоваться и в силовой электронике. Приведенная на рис. 7 конструкция состоит из ТТ диаметром 8 мм и длиной 300 мм, каждая из которых позволяет передавать тепловой поток до 70 Вт. Рассматривается изготовление таких радиаторов с ТТ диаметром 16 мм, когда каждая ТТ сможет передавать до 1 кВт, а вся сборка — до 32 кВт.

Паровые камеры

Проблема обеспечения теплового режима РЭА при высоких плотностях теплового потока привела к созданию так называемых паровых камер [23], эффективность применения которых на сегодняшний день подтверждена многочисленными научными исследованиями и массовостью их производства для серверных систем.

Паровая камера (ПК) представляет собой плоскую миниатюрную ТТ, ее основная функция — снижение плотности теплового потока за счет увеличения поверхности теплоотвода. ПК используются как элементы радиаторов.

В ПК пар конденсируется на поверхности, где расположена система отвода теплоты (на-

пример, радиатор), и возвращается в зону испарения под действием силы тяжести или за счет капиллярных сил в КС. В качестве КС сегодня в ПК чаще всего используется порошковые [24]. На корпусе паровой камеры также имеются столбики с КС, предотвращающие его сдавливание и, кроме того, повышающие эффективность ПК (рис. 8).

Основные преимущества ПК заключаются в том, что они имеют высокую скорость теплопередачи при запуске, малое термическое сопротивление и позволяют уменьшить плотность теплового потока. Так же как и ТТ, ПК имеют следующие определяющие свойства: пористость КС, размер пор КС, проницаемость КС, удельную площадь поверхности, теплопроводность и смачивание поверхности рабочей жидкостью.

В [26] было показано, что использование ПК позволило повысить эффективность активной системы охлаждения на 20% и на столько же уменьшить вес СОТР мощных серверов. Как было описано в [27], ПК может иметь эффективную теплопроводность около 800 Вт/(м·°С), что в два раза выше, чем у чистой меди. Замена обычной металлической пластины в системе охлаждения графического процессора на паровую камеру позволила уменьшить его площадь и повысить мощность [28]. Исследования показали, что когда высота ребер радиатора между ПК и вентилятором составляет 3—8 мм, характеристики системы оптимальны, а максимальный отводимый тепловой поток равен 90 Вт/см². Кроме того, при использовании медного радиатора с 53 ребрами высотой 3 мм, толщиной 0,2 мм, с расстоянием между ними 1,0 мм термическое сопротивление системы охлаждения на основе ПК минимально и составляет $0,265$ °С/Вт. В [29] установлено, что ПК имеет лучшие показатели масса/эффективность в интегральных системах теплопередачи (IHS).

В настоящее время ведутся работы по совершенствованию капиллярных структур для паровых камер. Так, например, в [30] приведены результаты работ по изготовлению новой порошковой КС методом инжекционного литья металла. Ее пористость составляет более 53%. Теплопроводность ПК на основе такой КС в 20 раз выше теплопроводности ТТ диаметром 10 мм. Тестовые данные показали, что использование

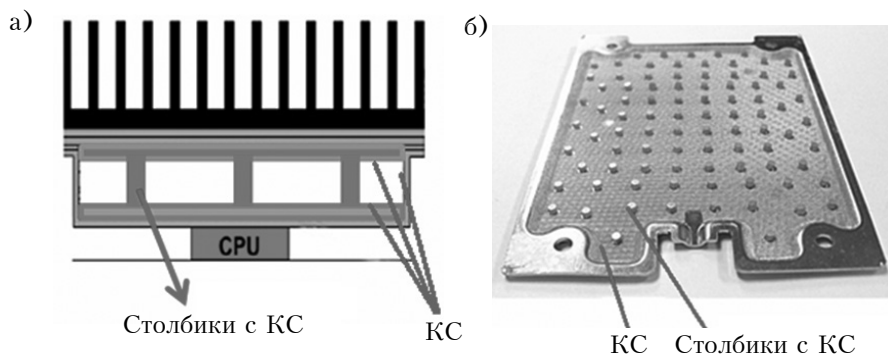


Рис. 8. Конструкция паровой камеры [25]

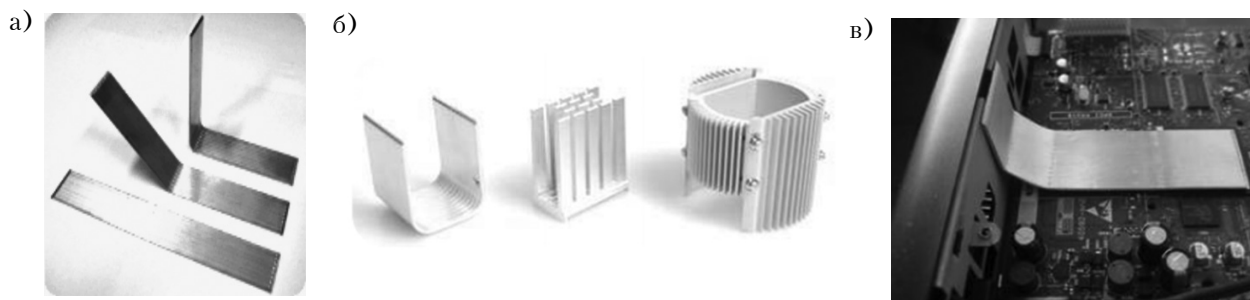


Рис. 9. Общий вид алюминиевых плоских ТТ без КС (а), системы охлаждения на их основе (б) и пример их применения в компьютерной технике (в) [35]

новой ПК повысила эффективность системы охлаждения на 33%.

Плоские тепловые трубы

Плоские ТТ только недавно начали широко внедряться в СОТР РЭА. К их достоинствам следует отнести то, что они позволяют отводить теплоту сразу от нескольких элементов и не требуют обеспечения специальной контактной поверхности, как в случае с круглыми ТТ. Основное преимущество таких ТТ — возможность придавать сложную форму системам охлаждения (рис. 9). Плоские ТТ предназначены для охлаждения центральных и графических процессоров, модулей памяти FBDIMM и UDIMM, систем освещения, оптических модулей связи, телекоммуникационного сетевого оборудования и электронных модулей с высокой мощностью.

Сегодня плоские ТТ выполняют из меди или алюминия, а проводящиеся исследования направлены в основном на поиск новых материалов для их изготовления. В [31] приведена информация о медной плоской ТТ с силиконовой КС, которая разрабатывалась для охлаждения элементов мощностью до 10 Вт (процессоров, систем питания светодиодов и самих сборок LED). Длина ТТ составляла 45 мм, ширина 16 мм, высота 1,5 мм, она обеспечивала отвод теплоты от площадки 16 16 мм. Проведенный авторами сравнительный анализ ТТ с медной канавчатой КС и с КС на основе силикона показал, что эффективность первой выше на 17%. Исследования показали целесообразность использования плоских медных ТТ с медными и с силиконовыми канавками для охлаждения систем электропитания светодиодов.

Использование неметаллических материалов в плоских ТТ сегодня наиболее дискутируемая в этой области тема. Однако такие работы ведутся и, очевидно, являются весьма перспективными. В [32] приведена информация о плоской ТТ с КС на основе кремния. Эта капиллярная структура представляет собой массив углеродных нанотрубок, которые образуют канавки. В горизонтальном положении такая ТТ способна передавать 24 Вт при плотности теплового потока 600 Вт/см².

Поскольку высота плоских ТТ мала (1–7 мм), зачастую они не имеют КС. Сегодня в системах охлаждения элементов РЭА используют алюминиевые плоские ТТ без КС (рис. 9) [33, 34], заправленные ацетоном. Они могут работать в температурном диапазоне от –40 до +100°C при углах наклона от 0 до 90°. Также ТТ могут иметь канавчатую КС, что позволяет применять их при малых углах наклона и в горизонтальном расположении. Габаритные размеры выпускаемых плоских ТТ составляют от 200 20 1,2 мм (длина ширина высота) до 500 50 2,5 мм при максимальной передающей мощности от 5–18 до 75–270 Вт (в зависимости от угла наклона и длины).

Гибкие тепловые трубы

Первая информация о гибких ТТ появилась в 1970 году [35]. Описанная ТТ была изготовлена из металлической (нержавеющая сталь) трубки с внутренним диаметром 25,4 мм и общей длиной 311 мм. Для реализации гибкости ТТ в ее адиабатической зоне использовалась гофрированная труба. Применялась четырехслойная сетчатая КС из нержавеющей стали. В качестве теплоносителя использовалась вода.

Первые коммерческие гибкие ТТ для наземного применения появились только в 2000-х годах. Так, в 2004 году компания FURUKAWA представила гибкую ТТ «Pera-flex», изготовленную из металлической фольги и тампонной материи, которые для повышения специализации теплоносителем были покрыты специальным материалом [36]. Толщина такой ТТ 0,7 мм, длина 150 м, ширина 20 мм, термическое сопротивление 1,0 К/Вт при передаваемой мощности 4 Вт. Испытания показали, что при угле сгиба ТТ 90° и радиусе изгиба 1 см теплопередающая мощность составляет 6 Вт.

В последнее время наблюдается постоянное увеличение интереса к созданию гибких ТТ, особенно из неметаллических материалов. Автор [37] приводит результаты разработки и исследований полимерной гибкой плоской ТТ размерами 130 70 1,31 мм (рис. 10). Ее корпус представляет собой набор листов из полиэтилентерефталата, алюминия и полиэтилена. КС изго-

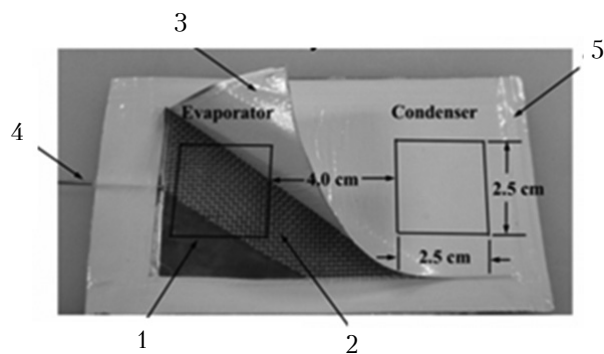


Рис. 10. Полимерная гибкая ТТ [37]:

1 — тройной слой медной сетки с покрытием SiO_2 ; 2 — нейлоновая сетка; 3 — слои полиэтилентерфталата, алюминия и полиэтилена; 4 — заправка; 5 — шов тепловой сварки

товлена спеканием трехслойной сетки. В качестве рабочей жидкости использовалась вода. При тепловом потоке 25 Вт температурный перепад между зоной испарения и конденсации составлял $1/4$ температурного перепада медной пластины таких же размеров. Если не учитывать термическое сопротивление полимерных слоев, то теплопроводность такой ТТ была в 4,6 раза выше теплопроводности медной пластины аналогичных размеров. При этом масса ТТ — 9,5 г, что составляет $1/5$ массы медной пластины.

В [38] приведены результаты исследований полимерной ТТ с сетчатой медной КС и метанолом в качестве теплоносителя. Ее толщина — 1,8 мм, возможный угол сгиба — до 45° . Для уменьшения термического сопротивления в зоне испарения часть корпуса в этой зоне была сделана из медной фольги. ТТ обеспечивала передачу теплового потока до 30 Вт. Ее термическое сопротивление составляло 0,157 К/Вт при передаваемом теплом потоке 25 Вт.

Контурные тепловые трубы

Контурная тепловая труба (КТТ) является пассивной двухфазной системой с капиллярной прокачкой жидкости и может рассматриваться как элемент систем охлаждения РЭА. Сегодня КТТ привлекают внимание как очень эффективные теплопередающие устройства для СОТР РЭА [39, 40]. Известные КТТ изготовлены из разнообразных материалов (нержавеющая сталь, медь, керамика), в них используются различные теплоносители (аммиак, вода, метанол, этанол, фреоны). Для систем охлаждения элементов компьютеров целесообразны, прежде всего, недорогие и доступные медные КТТ, заправленные водой.

Основные преимущества КТТ заключаются в том, что система охлаждения на их основе функционирует при любой ориентации в пространстве практически без изменения своих характеристик, остается работоспособной в движущихся системах при больших ускорениях (5g и бо-

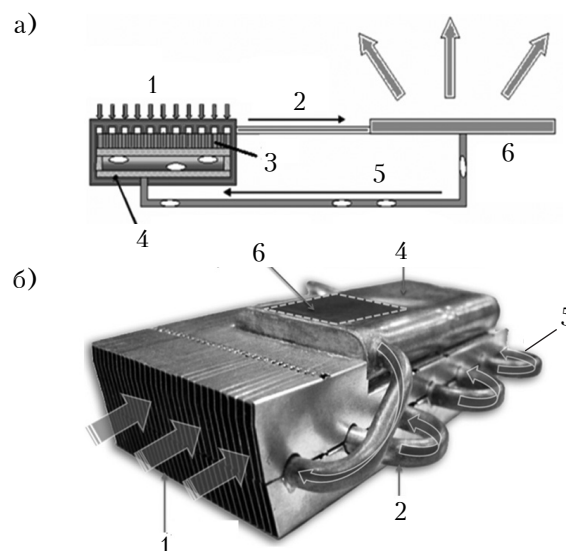


Рис. 11. Схема [18] (а) и общий вид [23] (б) СОТР на основе КТТ:

1 — зона теплоотвода; 2 — паровой канал; 3 — КС; 4 — компенсационная полость; 5 — жидкостной канал; 6 — зона подвода тепла

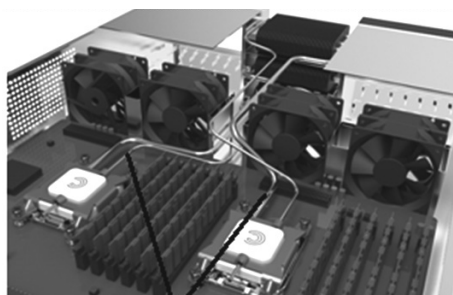
лее), а также позволяет обеспечить гибкую связь между зонами подвода и отвода тепла.

Конструктивная схема использования КТТ в СОТР РЭА приведена на рис. 11.

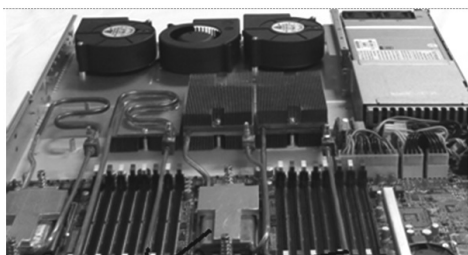
В [41] приведена информация о медных КТТ с керамической КС и водой в качестве рабочей жидкости. Эти КТТ были испытаны в сервере для охлаждения процессоров с мощностью 100 Вт. Авторы [42] приводят информацию о медной КТТ, испаритель которой имел форму диска диаметром 30 мм и высотой 10 мм. Такая КТТ с воздушным охлаждением отводила тепловой поток 70 Вт.

В [40] было показано, что КТТ особенно перспективны для применения в системах охлаждения РЭА малых размеров. Однако не только — КТТ являются перспективными и для силовой электроники, и для РЭА большой мощности. В этом направлении КТТ могут составить конкуренцию водяным системам охлаждения. Так, конструкция КТТ позволяет встраивать их в системы охлаждения серверов и суперкомпьютеров (рис. 12) [43]. В этом случае КТТ отводят тепловой поток за пределы рабочего пространства электронного блока к внешней системе теплоотвода. Возможна также и организация систем с рекуперацией тепла для обогрева зданий [44].

В [43] приведен один из вариантов практической реализации использования медной КТТ, заправленной водой, для охлаждения процессоров и графических процессоров, а также показана целесообразность и перспективность использования таких систем. Авторы приводят результаты анализа и испытаний системы охлаждения суперкомпьютеров на основе двух медных КТТ, эффективная длина которых состав-



КТТ



КТТ

Рис. 12. КТТ в системах охлаждения серверов и суперкомпьютеров [43]

ляла 400 мм. Размеры испарителя 80 42 7 мм. Испытания проводились в диапазоне температуры охлаждающей жидкости от 20 до 80°C при мощности от 20 до 600 Вт.

Широкое применение получили контурные термосифоны, фактически представляющие собой КТТ, в которых зона теплоотвода расположена выше зоны подвода тепла. Контурные термосифоны в перспективе могут стать устройствами, где можно будет применять гибкие испарители, поскольку к их испарителям не предъявляются жесткие требования. Такие конструкции могут использоваться в системах охлаждения силовой электроники. Так, например, в [45] приведена информация о применении контурного термосифона в системе охлаждения транзисторов IGBT с суммарной мощностью теплового рассеивания до 2 кВт и плотностью теплового потока 10 Вт/см².

Пульсационные тепловые трубы

Пульсационная тепловая труба (ПТТ) [46] сегодня рассматривается как новый тип ТТ, перспективный для использования в СОТР РЭА. При этом, однако, пока еще рано говорить об их массовом производстве. Исследования таких ТТ продолжаются, и они связаны, прежде всего, с обеспечением их стабильной работы и разработкой методик их расчета.

Основное преимущество ПТТ заключается в отсутствии капиллярной структуры, что делает более дешевой технологию их изготовления. Кроме того, поскольку конструкция ПТТ представляет собой систему из множества петель, образующих достаточно эффективную поверхность для теплоотдачи, отпадает необходимость использования дополнительных радиаторов. Немаловажным является и то, что ПТТ могут работать при любой ориентации в гравитационном поле, а также при движении с большим ускорением (например, ПТТ с габаритами 30 30 мм при ускорении 10g и плотности подводимого теплового потока 33 Вт/см² передавала 100 Вт тепла).

За последние 10–15 лет в мире было проведено достаточное количество экспериментальных и теоретических исследований, которые подтвердили работоспособность ПТТ. Анализ происходящих в них процессов приведен в [46]. Известно, что выбор конструктивных параметров (геометрия, число витков, общая длина трубки, диаметр ПТТ, длина зоны испарения и зоны конденсации) и видов материалов и теплоносителей является ключевым фактором, влияющим на функционирование ПТТ. В качестве материалов для корпуса ПТТ сегодня рассматриваются, прежде всего, нержавеющая сталь и медь. В литературе приводится информация по различным теплоносителям для ПТТ, в том числе по воде [48, 49], ацетону [50], фреонам [48, 50], жидкостям с микрочастицами (наножидкостям) [51, 52]. Наножидкости могут значительно повысить рабочие характеристики ПТТ [53]. Используя вместо дистиллированной воды такую наножидкость как, например, вода с по-

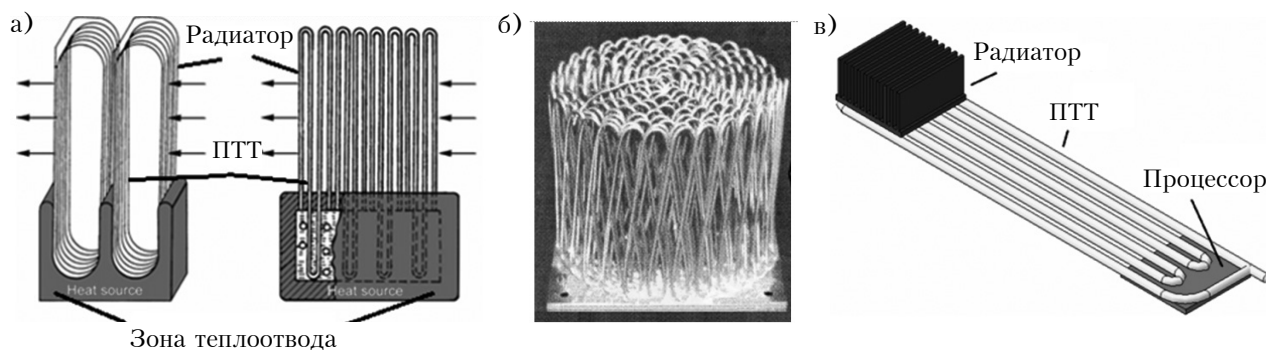


Рис. 13. Конструктивная схема радиатора на основе ПТТ (а), общий вид радиатора [48] (б) и пример схемного решения применения ПТТ в миниатюрных РЭА (в)

рошком Al_2O_3 , можно на 30% снизить термическое сопротивление ПТТ. Отмечено, что оптимальное заполнение ПТТ водой с порошком серебра составляет 50%, при этом термическое сопротивление ПТТ — 0,9 К/Вт, а при использовании воды с порошком оксида титана — соответственно, 40% и 0,8 К/Вт. Для сравнения: термическое сопротивление аналогичных ПТТ, заправленных дистиллированной водой, составило 1,15 К/Вт.

В качестве примера использования ПТТ в системах охлаждения РЭА можно привести радиаторы, выполненные на их основе, для IGBT-элементов [54] (рис. 13). При размерах радиатора 80 80 мм его термическое сопротивление составляет 0,089 К/Вт при передаваемом тепловом потоке 450 Вт и скорости воздуха 3 м/с. Конструктивно радиатор представляет собой ПТТ, изготовленную из трубки с внешним диаметром 1,6 мм, внутренним диаметром 1,2 мм, с числом петель 500.

Японская компания TS-Heatronics при разработке радиаторов HeatLine и Kenzan провела исследования различных комбинаций материалов корпуса и теплоносителя [48, 54], а именно: нержавеющая сталь и азот, медь и вода, метанол, R-113 и R-142b, алюминий и R-142b. Термическое сопротивление радиатора Kenzan размерами 60 60 65 мм, изготовленного из медной трубки (внешний диаметр 1,0 мм, внутренний диаметр 0,7 мм, количество петель 152), с теплоносителем R-142b составляло 0,3 К/Вт при скорости воздуха 3 м/с.

Тепловые трубы с постоянным термическим сопротивлением

ТТ с постоянным термическим сопротивлением и термосифоны широко используются сегодня в различных СОТР РЭА с мощностью от 50 Вт и выше. Существует много различных видов СОТР, выполненных на основе медных, стальных ТТ с капиллярной структурой и без нее, а также алюминиевых ТТ с канавчатой КС, работающих в режиме термосифона (рис. 14).

Для радиаторов, выпускаемых в Институте порошковой металлургии (Беларусь), использованы медные ТТ диаметром от 3 до 20 мм, длиной до 720 мм, максимальной передаваемой мощностью до 500 Вт, с порошковой КС и без КС.

Теплоносителем может быть вода, этанол либо метанол [55]. Такие радиаторы обеспечивают отвод тепловых потоков до 4000 Вт.

Компания DAU (Австрия) предлагает различные варианты систем охлаждения на основе тепловых труб [56]. В зависимости от условий эксплуатации и требуемых характеристик в системах могут использоваться ТТ из алюминия, нержавеющей стали, меди с различными теплоносителями в зависимости от температуры эксплуатации: вода для диапазона от +5 до +275°C, метанол для диапазона от -40 до +80°C. Такие радиаторы могут обеспечивать отвод тепла 1000 Вт и более.

Перспективным является использование алюминиевых ТТ с канавчатой КС для охлаждения РЭА [57], в качестве теплоносителя в которых могут использоваться аммиак и ацетон. Такие ТТ обеспечивают теплоотвод при плотности теплового потока до 20 Вт/см².

Следует обратить внимание на системы специального назначения, в которых предъявляются высокие требования к ТТ. Так, например, работающие в режиме термосифона алюминиевые ТТ диаметром 12,5 мм, заправленные аммиаком, имеют температурный перепад не более 2°C при передаваемой тепловой мощности 150 Вт в температурном диапазоне от -40 до +100°C. Алюминиевые ТТ можно широко использовать в системах обеспечения тепловых режимов электронных приборов, расположенных в герметичном корпусе. Известно, что такие приборы работают в жестких атмосферных условиях, в пожаро- и взрывоопасных местах, и основной проблемой здесь является невозможность организовать интенсивное охлаждение электронных компонентов, находящихся внутри приборов. В этом случае организуется отвод тепла от теплонагруженных элементов к корпусу прибора, который и является радиатором. Алюминиевые ТТ применяются и в конструкции системы охлаждения шкафов с РЭА, предназначенных для использования на морском и речном транспорте [58]. U-образные алюминиевые ТТ, имитаторы секции приборного шкафа и многосекционной стойки электронных блоков на их основе были изготовлены в НТУУ «КПИ». СОТР обеспечивала функционирование РЭА при тепловых нагрузках 500 — 3600 Вт для имитатора секции приборного



Рис. 14. Радиаторы на основе обычных ТТ:
а — на основе медных и стальных ТТ [55]; б — на основе медных ТТ [56];
в — на основе алюминиевых ТТ с канавчатой КС [57]

шкафа и 710—4330 Вт для имитатора многосекционной стойки при температуре воды на входе 6—23°C и изменении угла наклона от 0 до 15°.

Заключение

Как видно из приведенного в статье анализа различных вариантов применения тепловых труб, использование тепловых труб в системах охлаждения РЭА является не только перспективным, но и необходимым. Каждый из существующих типов ТТ имеет свои преимущества и недостатки, которые и определяют возможность их применения в той или иной конструкции РЭА. Однако при проектировании СОТР на основе ТТ надо принимать во внимание то, что ТТ вносят дополнительное термическое сопротивление, в связи с чем необходимо найти такое схемное решение, которое его скомпенсирует за счет повышения развитой поверхности и эффективности системы теплоотвода. Кроме того, желательно принимать во внимание такую компоновку, при которой ТТ будет работать в режиме термосифона, обеспечив при этом высокую теплопередающую способность и низкие значения термического сопротивления. В некоторых случаях необходимо учесть способность и эффективность ТТ работать против силы тяжести.

Таким образом, из всего сказанного можно заключить, что эффективность применения тепловых труб в СОТР может быть достигнута лишь при комплексном подходе к конструированию как самого электронного изделия, так и системы обеспечения теплового режима РЭА.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Singh R, Mochizuki M, Mashiko K, Nguyen T. Heat pipe based cold energy storage systems for datacenter energy conservation // *Energy*. — 2011. — Vol. 36, iss. 5. — P. 2802 — 2811. DOI: 10.1016/j.energy.2011.02.021
2. Reay D.A., Kew P.A. Heat pipes (fifth edition): theory, design and applications. — Butterworth-Heinemann, 2006.
3. Гниличенко В.И., Смирнов Г.Ф., Ткаченко В.Б. Тепловые трубы в системах обеспечения тепловых режимов электронных средств // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. — 1999. — № 4. — С. 15 — 19.
4. Николаенко Ю.Є. Засоби забезпечення теплових режимів на основі теплових труб для пристроїв обчислювальної техніки та керування // Автореф. дис. ... д. т. н. — Київ: ІТТФ НАНУ, 2009.
5. Qualification of two-phase heat transport systems "ECSS-E-ST-31-02C PR". ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division. — The Netherlands, Noordwijk 2010.
6. <http://www.quick-cool-shop.de>
7. <http://www.furukawa.co.jp/>
8. Booklet "A reliable advanced cooling technology meets high density mounting for electronic application". — Japan, Furukawa, 2014.
9. <http://www.coolermaster.com/>
10. <http://www.zalman.com/>
11. http://www.techpowerup.com/reviews/Impactics/C3LH_B_KISS_Coolset
12. Патент №2474888 РФ. Охлаждающее устройство для электронных компонентов / Бухтияров Ю.В., Штурма И.Ю., Кравец В.Ю., Паламарчук А.Я. — 2013. — Бюл. № 4.
13. Badran B., Gerner F., Ramada P. et al. Experimental results for low-temperature silicon micromachined micro heat pipe arrays using water and methanol as working fluids // *Experimental Heat Transfer*. — 1997. — N 10. — P. 253—272.
14. Lallemand M., Lefevre F. Micro/Mini heat pipes for the cooling of electronic devices // *Preprints of the 13th Int. Heat Pipe Conference*. — China, Shanghai. — 2004. — P. 12—23.
15. Wang J. C. Superposition method to investigate the thermal performance of heat sink with embedded heat pipes // *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*. — 2009. — Vol. 36, N 7. — P. 686—692.
16. Wang J. C., Wang R. T., Chang C. C., Huang C. L. Program for rapid computation of the thermal performance of a heat sink with embedded heat pipes // *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*. — 2010. — Vol. 31, N 1. — P. 21—28.
17. Lefevre F., Lallemand M. Coupled thermal and hydrodynamic models of flat micro heat pipes for the cooling of multiple electronic components // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. — 2006. — Vol. 49. — P. 1375—1383.
18. Ektumakij P., Kumthontikun V., Kuriyama H. et al. New Composite wick heat pipe for cooling personal computers // *Preprints of the 13th Int. Heat Pipe Conference*. — China, Shanghai. — 2004. — P. 263—268.
19. Vasiliev L.L., Antukh A.A., Maziuk V.V. et al. Miniature heat pipes experimental analysis and software development // *Proc. of the 12th Int. Heat Pipe Conf.* — Russia, Moscow. — 2002. — P. 329—335.
20. Vasiliev L.L. Micro and miniature heat pipes — electronic components cooler // *Proc. VI Minsk Int. Sem. "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators"*. — Belarus, Minsk. — 2005. — P. 74—76.
21. Kravets V.Yu., Nikolaenko Yu.E., Nekrashevich Ya.V. Experimental studies of heat-transfer characteristics of miniaturized heat pipes // *Heat Transfer Research*. — 2007. — Vol. 38, N 6. — P. 553—563.
22. <http://blog.hilltech.com/>
23. Wang R.-T., Wang J.-Ch., Chang T.-L. Experimental analysis for thermal performance of a vapor chamber applied to high-performance servers // *Journal of Marine Science and Technology*. — 2011. — Vol. 19, N 4. — P. 353—360.
24. Wei X., Sikka K. Modeling of vapor chamber as heat spreading devices // *Proc. 10th Int. Conf. on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems*. — San Diego, CA. — 2006. — P. 578—585. — DOI: 10.1109/ITHERM.2006.1645397
25. <http://odm.coolermaster.com/>
26. Wei J. Challenges in cooling design of CPU packages for high-performance servers // *Heat Transfer Engineering*. — 2006. — Vol. 29, N 2. — P. 178—187.
27. Lin J. C., Wu J. C., Yen C. T., Yang C. Y. Fabrication and performance analysis of metallic micro heat spreader for CPU // *Proc. 13th International Heat Pipe Conference*. — Shanghai, China. — 2004. — P. 21-25.
28. Wang J. C. Development of vapour chamber-based VGA thermal module // *Int. Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. — 2010. — Vol. 20, N 4. — P. 416—428. — DOI: 10.1108/09615531011035811
29. Koito Y., Imura H., Mochizuki M. et al. Fundamental experiments and numerical analyses on heat transfer characteristics of a vapor chamber (Effect of heat source size) // *JSME Int. Journal, Ser. B*. — 2006. — Vol. 49, N 4. — P. 1233—1240. — DOI: 10.1299/jsmeb.49.1233
30. Yu C.S., Wei W.C., Kang S.W. Investigation of micro porosity sintered wick in vapor chamber for fan less design // *13th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems*. — 2007. — Budapest, Hungary. — P. 1—4.
31. Wang X.-D., Zou L.-L., Liu J.-G. et al. Experimental investigation of copper-grooved micro heat pipes (MHPs) // *Journal of Solid State Lighting*. — 2014. — Vol. 1, N 14. — P. 1—8. DOI: 10.1186/s40539-014-0014-5
32. Cai Q., Chen C.L. Design and test of carbon nanotube biwick structure for high-heat flux phase change heat transfer // *J. Heat Transfer*. — 2010. — Vol. 132, iss. 5. — P. 052403-8. DOI:10.1115/1.4000469.
33. <http://www.thermotekusa.com/>

34. http://www.amethermasol.co.uk/AmetThermasolPDF/MHP_Series.pdf
35. Bliss F.E., Clark E.G., Stein B. Construction and test of a flexible heat pipe // ASME Conference paper, 70-HT/SpT-13. — Los Angeles, California, 1970.
36. Ultra-thin sheet-shaped heat pipe 'Pera-fle' // Furukawa Rev. — 2004. — N 25. — P. 64–66. — www.furukawa.co.jp/review/
37. Oshman C., Shi B., Li C. et al. The development of polymer-based flat heat pipes // J. Microelectromechanical Systems. — 2011. — N 20, iss. 2. — P. 410–417. — DOI: 10.1109/JMEMS.2011.2107885
38. Wu G.W., Shih W.P., Chen S.L. Lamination and characterization of a PET flexible micro heat pipe // Proc. 10th Int. Heat Pipe Symp. — 201. — Taipei, Taiwan. — P. 1–6.
39. Huang B.J., Wang C.H., Lin T.T. et al. Development of a low-cost LHP for commercial application // Proc. 13th international heat pipe conf. — 2004. — Shanghai, China. — P. 211–215.
40. Maydanik Y., Vershinin S., Korukov M., Ochterbeck J. Miniature loop heat pipes — a promising means for cooling electronics // IEEE Transactions on Components and Packaging Technology. — 2005. — Vol. 28, N 2. — P. 290–296. — DOI: 10.1109/TCAPT.2005.848487
41. Zimbeck W., Slavik G., Cennato J., Kang S., Yun J., Krolczek E. Loop heat pipe technology for cooling computer servers // Proc. 11th IEEE Conf. on Thermal Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. — Orlando, FL. — 2008. — pp. 19–25.
42. Singh R., Akbarzadeh A., Dixon C. et al. Miniature loop heat pipe with flat evaporator for cooling computer CPU // IEEE Trans. Comp. Pack. Technol. — 2007. — Vol. 30, iss. 1. — P. 42–49. DOI: 10.1109/TCAPT.2007.892066
43. <http://www.calyos-tm.com/>
44. Chernysheva M.A., Yushakova S.I., Maydanik Yu.F. Copper water loop heat pipes for energy-efficient cooling systems of supercomputers // Energy. — 2014. — Vol. 69. — P. 534–542. — DOI: 10.1016/j.energy.2014.03.048
45. Kang S. S. Advanced cooling for power electronics // Proc. Int. Conf. on Integrated Power Electronics Systems (CIPS 2012). — 2012. — Nuremberg, Germany. — P. 1–8.
46. Khandekar S., Charoensawan P., Groll M., Terdtoon P. Closed loop pulsating heat pipes. Part B: Visualization and semi-empirical modeling // Applied Thermal Engineering. — 2003. — Vol. 23, iss. 16. — P. 2021–2033. — DOI:10.1016/S1359-4311(03)00168-6
47. Zhang Y., Faghri A. Advances and unsolved issues in pulsating heat pipes // Journal of Heat Transfer Engineering. — 2008. — Vol. 29, iss. 1. — P. 20–44. — DOI:10.1080/01457630701677114
48. Khandekar S. Thermo-hydrodynamics of closed loop pulsating heat pipes / Ph.D. Thesis. — Germany: University of Stuttgart, 2004.
49. Wilson C., Borgmeyer B., Winholtz R.A. et al. Thermal and visual observation of water and acetone oscillating heat pipes // Journal of Heat Transfer. — 2011. — Vol. 133, iss. 6. — P. 061502-5. — DOI:10.1115/1.4003546
50. Naphon P., Thongkum D., Assadamngkol P. Heat pipe efficiency enhancement with refrigerant-nanoparticles mixtures // Journal of Energy Conversion and Management. — 2009. — Vol. 50, iss. 3. — P. 772–776. — DOI: 10.1016/j.enconman.2008.09.045
51. Wang S., Lin Z., Zhang W., Chen J. Experimental study on pulsating heat pipe with functional thermal fluids // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. — 2009. — Vol. 52, iss. 21-22. — P. 5276–5279. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.04.033
52. Wang S., Lin Z., Zhang W. et al. Heat transport characteristics of an oscillating heat pipe with Al₂O₃ nanofluid // 2nd Micro/Nanoscale Heat&Mass Transfer International Conference (ASME 2009). — 2009. — Shanghai, China. — P. 18530.
53. Mohammadi N., Mohammadi M., Shafii M. B. A review of nanofluidic pulsating heat pipes: suitable choices for thermal management of electronics // Frontiers in Heat Pipes (FHP). — 2012. — Vol. 3, N 3 (3-033001). — 17 p. — DOI: 10.5098/fhp.v3.3.3001
54. Akachi H., Polasek F. Thermal control of IGBT modules in traction drives by pulsating heat pipes // Preprint 10th Int. Heat Pipes Conf. Vol. 3. — 1998. — Stuttgart, Germany. — P. 8–12.
55. <http://pminstitute.by/produce/poristye-materialy/50.html>
56. <http://www.dau-at.com/en/products/heatpipes-fuer-high-thermal-performance/>
57. Хайрмасов С.М., Рассамкин Б.М., Рассамкин А.Б. Применение алюминиевых тепловых труб в системах охлаждения радиоэлектронной аппаратуры // Труды XV МНПК «Современные информационные и электронные технологии» («СИЭТ-2014»). — Одесса, Украина. — 2014. — С. 8–11.
58. Рассамкин Б.М., Николаенко Ю.Е., Хайрмасов С.М. Исследование влияния углов наклона на тепловые характеристики водяной системы охлаждения приборного шкафа на основе тепловых труб // Труды МНПК «Современные информационные и электронные технологии» («СИЭТ-2009»). — Одесса, Украина. — 2009. — С. 73.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 27.04 2015 г.*

С. М. ХАЙРМАСОВ

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут»
E-mail: Sergey.Khairnasov@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ ТРУБ В СИСТЕМАХ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ РЕА: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Істотний внесок у вирішення завдання забезпечення теплових режимів функціонування радіоелектронної апаратури належить впровадженню ефективних теплопередавальних і теплообмінних систем на основі теплових труб. Сьогодні можна виділити наступні напрями використання теплових труб: електронна апаратура, комп'ютерна техніка різного призначення, силова електроніка. У статті наводиться аналіз сучасного стану та перспектив використання теплових труб в системах забезпечення теплових режимів радіоелектронної апаратури наземного застосування.

Ключові слова: тепла труба, термосифон, РЕА, комп'ютерна техніка, система охолодження.

THE USE OF HEAT PIPES IN THERMAL CONTROL SYSTEM
FOR ELECTRONICS: CURRENT SITUATION AND PROSPECTS

Today, the widespread application of cooling systems based on heat pipes makes significant contribution to the solution of the thermal control of electronic equipment. The use of heat pipes as heat transfer devices and heat exchanging equipment allows creating an efficient new-generation heat sinks. Nowadays, heat pipes are widely used in the following areas: electronic equipment, special application computer equipment (from small computers to large data centres), high power electronics. The article provides an analysis of the current state and prospects of heat pipes application in thermal control systems for ground-based electronic equipment.

Keywords: heat pipe, thermosyphon, electronics, computer equipment, cooling system.

REFERENCES

1. Singh R, Mochizuki M, Mashiko K, Nguyen T. Heat pipe based cold energy storage systems for datacenter energy conservation. *Energy*, 2011, vol 36, iss. 5, pp. 2802-2811. DOI: 10.1016/j.energy.2011.02.021
2. Reay D.A., Kew P.A. *Heat pipes (fifth edition): theory, design and applications*. Butterworth-Heinemann, 2006, 374 p.
3. Gnilychenko V.I., Smirnov G.F., Tkachenko V.B. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 1999, no 4, pp. 15-19. (Rus)
4. Nikolaenko Yu.Ye. *Zasobi zabezpechennya teplovikh rezhimiv na osnovi teplovikh trub dlya pristroyiv obchisluyval'noyi tekhniki ta keruvannya*. Autoref. Diss. dokt. tekhn. nauk [Means of thermal modes based on heat pipes for computing devices and control. Thes. of the Dr. tech. sci. diss.]. Kyiv, Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2009, 36 p. (Ukr)
5. *Qualification of two-phase heat transport systems "ECSS-E-ST-31-02C PR"*. ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division. The Netherlands, Noordwijk, 2010, p. 80.
6. <http://www.quick-cool-shop.de>
7. <http://www.furukawa.co.jp/>
8. Booklet "A reliable advanced cooling technology meets high density mounting for electronic application", Furukawa, Japan, 2014, p. 6.
9. <http://www.coolermaster.com/>
10. <http://www.zalman.com/>
11. http://www.techpowerup.com/reviews/Impactics/C3LH_B_KISS_Coolset
12. Bukhtiyarov Yu.V. et al. Okhlazhdayushchee ustroystvo dlya elektronnykh komponentov [The cooling device for electronic components]. *Patent RF no 2474888*, 2013.
13. Badran B., Gerner F., Ramada P., Henderson T., Baker K. Experimental results for low – temperature silicon micromachined micro heat pipe arrays using water and methanol as working fluids. *Experimental Heat Transfer*, 1997, no 10, pp. 253-272.
14. Lallemand M., Lefevre F. Micro/Mini heat pipes for the cooling of electronic devices. *Preprints of the 13th Int. Heat Pipe Conference*, Shanghai, China, 2004, pp. 12-23.
15. Wang, J. C. Superposition method to investigate the thermal performance of heat sink with embedded heat pipes. *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 36, no. 7, pp. 686-692.
16. Wang J. C., Wang R. T., Chang C. C., Huang C. L. Program for rapid computation of the thermal performance of a heat sink with embedded heat pipes. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, vol. 31, no. 1, 2010, pp. 21-28.
17. Lefevre F., Lallemand M. Coupled thermal and hydrodynamic models of flat micro heat pipes for the cooling of multiple electronic components. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, vol. 49, pp. 1375-1383.
18. Ektummakij P., Kumthongkittikun V., Kuriyama H., Mashiko K., Mochizuki M., Saito Yu., Nguyen Th. New Composite wick heat pipe for cooling personal computers. *Preprints of the 13th Int. Heat Pipe Conference*, Shanghai, China, 2004, pp. 263-268.
19. Vasiliev L.L., Antukh A.A., Maziuk V.V., Kulakov A.G., Rabetsky M.I., Vasiliev Jr L.L., Oh Se Min. Miniature heat pipes experimental analysis and software development. *Proc. 12th Int. Heat Pipe Conference*, Moscow, 2002, pp. 329-335.
20. Vasiliev L.L. Micro and miniature heat pipes – electronic components cooler. *Proc. VI Minsk Int. Sem. "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators"*, Minsk, Belarus, 2005, pp. 74-76.
21. Kravets V.Yu., Nikolaenko Yu.E., Nekrashevich Ya.V. Experimental studies of heat-transfer characteristics of miniaturized heat pipes. *Heat transfer research*, 2007, vol. 38, no. 6, pp. 553-563.
22. <http://blog.hilltech.com/>
23. Wang R.-T., Wang J.-Ch., Chang T.-L. Experimental analysis for thermal performance of a vapor chamber applied to high-performance servers. *Journal of Marine Science and Technology*, 2011, vol. 19, no. 4, pp. 353-360.
24. Wei X., Sikka, K. Modeling of vapor chamber as heat spreading devices. *Proc. 10th Int. Conf. on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems*, San Diego, CA, 2006, pp. 578-585. DOI: 10.1109/ITHERM.2006.1645397
25. <http://odm.coolermaster.com/>
26. Wei J. Challenges in cooling design of CPU packages for high-performance servers. *Heat Transfer Engineering*, 2006, vol. 29, no. 2, pp. 178-187.
27. Lin J. C., Wu J. C., Yen C. T., Yang C. Y. Fabrication and performance analysis of metallic micro heat spreader

for CPU. *Proc. 13th International Heat Pipe Conference, Shanghai*, China, 2004, pp. 21-25.

28. Wang J. C. Development of vapour chamber-based VGA thermal module. *Int. Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2010, vol. 20, no. 4, pp. 416-428. DOI: 10.1108/09615531011035811

29. Koito Y., Imura H., Mochizuki M., Saito Y., Torii S. Fundamental experiments and numerical analyses on heat transfer characteristics of a vapor chamber (Effect of heat source size). *JSME International Journal, Series B*, 2006, vol. 49, no. 4, pp. 1233-1240. DOI: 10.1299/jsmeb.49.1233

30. Yu C.S., Wei W.C., Kang S.W. Investigation of micro porosity sintered wick in vapor chamber for fan less design, *13th International Workshop on thermal investigations of ICs and systems*, 2007, Budapest, Hungary, 2007, pp. 1 – 4.

31. Wang X.-D., Zou L.-L., Liu J.-G., Luo Y., Liu G., Yu B.-K. Experimental investigation of copper-grooved micro heat pipes (MHPs). *Journal of Solid State Lighting*, 2014, vol. 1, no. 14, pp. 1-8. DOI: 10.1186/s40539-014-0014-5

32. Cai Q., Chen C.L. Design and test of carbon nanotube biwick structure for high-heat flux phase change heat transfer. *J. Heat Transfer*, 2010 Vol. 132, iss. 5, pp. 052403-8. DOI:10.1115/1.4000469.

33. <http://www.thermotekusa.com/>

34. http://www.amethermasol.co.uk/AmecThermasolPDF/MHP_Series.pdf

35. Bliss F.E., Clark E.G., Stein B. Construction and test of a flexible heat pipe. *ASME Conference paper*, 70-HT/SpT-13, Los Angeles, California, 1970.

36. *Ultra-thin sheet-shaped heat pipe 'Pera-fle'*. Furukawa Rev, 2004, no. 25, pp. 64-66. www.furukawa.co.jp/review/

37. Oshman C., Shi B., Li C., Yang R.G., Lee Y.C., Peterson G.P., Bright V.M. The development of polymer-based flat heat pipes. *J. Microelectromechanical Systems*, 2011, vol. 20, iss. 2, pp. 410-417. DOI: 10.1109/JMEMS.2011.2107885

38. Wu G.W., Shih W.P., Chen S.L. Lamination and characterization of a PET flexible micro heat pipe. *Proc. 10th Int. Heat Pipe Symp.*, 2011, Taipei, Taiwan, pp. 1-6.

39. Huang B.J., Wang C.H., Lin T.T., Huang H.H., Yeh Y.Y. Development of a low-cost LHP for commercial application. *Proc. 13th international heat pipe conf.*, 2004, Shanghai, China, pp. 211-215.

40. Maydanik Y., Vershinin S., Korukov M., Ochterbeck J. Miniature loop heat pipes – a promising means for cooling electronics. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technology*, vol. 28, no. 2, 2005, pp. 290-296. DOI: 10.1109/TCAPT.2005.848487

41. Zimbeck W., Slavik G., Cennato J., Kang S., Yun J., Krolczek E. Loop heat pipe technology for cooling computer servers. *Proc. 11th IEEE Conf. on Thermal Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, Orlando, FL; 2008. pp. 19-25.

42. Singh R., Akbarzadeh A., Dixon C., Mochizuki M., Riehl R.R. Miniature loop heat pipe with flat evaporator for cooling computer CPU. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2007, vol. 30, iss. 1, pp. 42-49. DOI: 10.1109/TCAPT.2007.892066

43. <http://www.calyos-tm.com/>

44. Chernysheva M.A., Yushakova S.I., Maydanik Yu.F. Copper water loop heat pipes for energy-efficient cooling

systems of supercomputers. *Energy*, 2014, vol. 69, pp. 534-542. DOI: 10.1016/j.energy.2014.03.048

45. Kang S. S. Advanced cooling for power electronics. *Proc. Int. Conf. on Integrated Power Electronics Systems, CIPS 2012*, Nuremberg, Germany, pp. 1-8.

46. Khandekar S., Charoensawan P., Groll M., Terdtoon P. Closed loop pulsating heat pipes. Part B: Visualization and semi-empirical modeling. *Applied Thermal Engineering*, 2003, vol. 23, iss. 16, pp. 2021-2033. DOI:10.1016/S1359-4311(03)00168-6

47. Zhang Y., Faghri A. Advances and unsolved issues in pulsating heat pipes. *Journal of Heat Transfer Engineering*, 2008, vol. 29, iss. 1, pp. 20-44. DOI:10.1080/01457630701677114

48. Khandekar S. *Thermo-hydrodynamics of closed loop pulsating heat pipes. Ph.D. Thesis*. University of Stuttgart, Germany, 2004.

49. Wilson C., Borgmeyer B., Winholtz R.A., Ma H.B., Jacobson D.L., Hussey D.S. Thermal and visual observation of water and acetone oscillating heat pipes. *Journal of Heat Transfer*, 2011, vol. 133, iss. 6, pp. 061502-5. DOI:10.1115/1.4003546

50. Naphon P., Thongkum D., Assadamongkol P. Heat pipe efficiency enhancement with refrigerant-nanoparticles mixtures. *Journal of Energy Conversion and Management*, 2009, vol. 50, iss. 3, pp. 772-776. DOI: 10.1016/j.enconman.2008.09.045

51. Wang S., Lin Z., Zhang W., Chen J. Experimental study on pulsating heat pipe with functional thermal fluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 52, iss. 21-22, pp. 5276 - 5279. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.04.033

52. Wang S., Lin Z., Zhang W., Chen J., Tang Y. Heat transport characteristics of an oscillating heat pipe with Al₂O₃ nanofluid. *2nd Micro/Nanoscale Heat & Mass Transfer International Conference ASME 2009*, Shanghai, China, p. 18530.

53. Mohammadi N., Mohammadi M., Shafii M. B. A review of nanofluidic pulsating heat pipes: suitable choices for thermal management of electronics. *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*, 2012, vol. 3, no. 3 (3- 033001), 17 p. DOI: 10.5098/fhp.v3.3.3001

54. Akachi H., Polasek F. Thermal control of IGBT modules in traction drives by pulsating heat pipes. *Preprint 10th Int. Heat Pipes Conf.*, vol. 3, 1998, Stuttgart, Germany, pp. 8-12.

55. <http://pminstitute.by/produce/poristye-materialy/50.html>

56. <http://www.dau-at.com/en/products/heatpipes-fuer-high-thermal-performance/>

57. Khairnasov S. M., Rassamakin B. M., Rassamakin A. B. Aluminium heat pipes application to electronic cooling systems. *Proc. ISPC "Modern Information and Electronic Technologies" ("MIET-2014")*, Odessa, Ukraine, 2014, pp. 8-11. (Rus)

58. Rassamakin B.M., Nikolaenko Yu.E., Khairnasov S.M. *Proc. ISPC "Modern Information and Electronic Technologies" ("MIET-2009")*, Odessa, Ukraine, 2009, p. 73. (Rus)

К. т. н. В. П. ЗАЙКОВ¹, д. т. н. В. И. МЕЩЕРЯКОВ², Ю. И. ЖУРАВЛЕВ³

Украина, г. Одесса, ¹НИИ «Шторм», ²Одесский государственный экологический университет,

³Одесская национальная морская академия

E-mail: gradan@ua.fm

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ. ЧАСТЬ 2: ДВУХКАСКАДНЫЕ ТЭУ

В продолжение исследований однокаскадных термоэлектрических устройств (ТЭУ) рассмотрено влияние термоэлектрической эффективности исходных материалов модулей на показатели надежности двухкаскадных ТЭУ. Показано, что с ее ростом уменьшается интенсивность отказов и увеличивается вероятность безотказной работы двухкаскадного ТЭУ для различных значений перепада температуры (от 60 до 90 К) и условий функционирования.

Ключевые слова: термоэлектрические устройства, надежность, интенсивность отказов, эффективность, температура, рабочий ток.

Базовым требованием к любым радиотехническим системам с теплонагруженными элементами является обеспечение повышенного уровня их надежности, которое связано с надежностью входящих в состав таких систем охлаждающих устройств. В настоящее время в радиоэлектронике, квантовой оптике, СВЧ-технике, информационных системах и др. широко применяются термоэлектрические устройства (ТЭУ). Они отличаются высокой надежностью, малыми габаритами, простотой управления и быстродействием, а проблема расширения температурного диапазона эксплуатации элементов и составных частей радиоэлектронной аппаратуры может быть решена применением каскадных термоэлектрических охлаждающих устройств [1].

Одним из основных способов повышения показателей надежности при проектировании термоэлектрического устройства является конструктивный, основанный на выборе режима его работы в зависимости от условий функционирования [2–5]. В то же время, как было показано в [6] для однокаскадных устройств, надежность ТЭУ можно повышать параметрическими методами, основанными на улучшении качества исходных термоэлектрических материалов, в первую очередь — на повышении их эффективности.

Целью настоящей работы является анализ влияния термоэлектрической эффективности исходных материалов Z_M на такие показатели надежности двухкаскадных термоэлектрических устройств, как интенсивность отказов λ_Σ и вероятность их безотказной работы P для различных значений перепада температуры (от 60 до 90 К) и условий функционирования.

Для определения основных параметров и показателей надежности каскадных ТЭУ воспользуемся моделью взаимосвязи их показателей надежности и основных значимых параметров [2].

Относительную величину интенсивности отказов двухкаскадного ТЭУ можно записать в виде

$$\frac{\lambda_\Sigma}{\lambda_0} = \sum_{i=1}^2 \frac{n_i B_i^2 (\theta_i + C_i) \left(B_i + \frac{\Delta T_{\max i}}{T_{i-1}} \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max i}}{T_{i-1}} \theta_i \right)^2} K_{T_i}, \quad (1)$$

где λ_0 — номинальная интенсивность отказов, $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч;

i — номер каскада (далее i в обозначении означает принадлежность параметра к соответствующему каскаду);

n_i — количество термоэлементов;

B_i — относительный рабочий ток, $B_i = I / I_{\max i}$;

θ_i — относительный перепад температуры, $\theta_i = \Delta T_i / \Delta T_{\max i}$;

C_i — относительная тепловая нагрузка, $C_1 = Q_0 / (n_1 I_{\max 1}^2 R_1)$, $C_2 = (Q_0 + W_1) / (n_2 I_{\max 2}^2 R_2)$;

T_0 — температура теплопоглощающего (холодного) спая первого каскада (К);

T — температура тепловыделяющего (горячего) спая второго каскада (К);

T_1 — промежуточная температура (К);

ΔT_i — перепад температуры (К), $\Delta T_1 = T_1 - T_0$, $\Delta T_2 = T - T_1$;

$\Delta T_{\max i}$ — максимальный перепад температуры (К), $\Delta T_{\max i} = 0,5 Z_i T_{i-1}^2$;

$I_{\max i}$ — максимальный рабочий ток (А), $I_{\max i} = e_i T_0 / R_i$;

I — рабочий ток (А);

e_i, R_i, Z_i — соответственно, коэффициент термоэдс (В/К), электрическое сопротивление (Ом) и усредненная термоэлектрическая эффективность материала (1/К) ветви термоэлемента;

Q_0 — тепловая нагрузка (Вт);

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

K_{T_i} — коэффициент значимости, учитывающий влияние пониженных температур [2];

W_1 — мощность потребления первого каскада (Вт),

$$W_1 = 2n_1 I_{\max 1}^2 R_1 B_1 \left(B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \theta_1 \right). \quad (2)$$

Вероятность безотказной работы N -каскадного ТЭУ можно представить в следующем виде:

$$P = \exp \left(- \sum_{i=1}^N \lambda_i t \right), \quad (3)$$

где t — назначенный ресурс, $t=10^4$ ч.

Отношение количества термоэлементов в смежных каскадах можно представить в виде

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{I_{\max 1}^2 R_1}{I_{\max 2}^2 R_2} \frac{2B_1 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \theta_1 \right) + B_1^2 - \theta_1}{2B_2 - B_2^2 - \theta_2}. \quad (4)$$

Холодопроизводительность каскадного ТЭУ определяется первым каскадом и может быть представлена в виде

$$Q_0 = n_1 I_{\max 1}^2 R_1 (2B_1 - B_1^2 - \theta_1). \quad (5)$$

Холодильный коэффициент двухкаскадного ТЭУ можно записать в виде

$$E = Q_0 / (W_1 + W_2), \quad (6)$$

где W_2 — мощность потребления второго каскада,

$$W_2 = 2n_2 I_{\max 2}^2 R_2 B_2 \left(B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \theta_2 \right). \quad (7)$$

В таблице приведены результаты расчетов основных значимых параметров и показателей надежности двухкаскадного ТЭУ при различных значениях термоэлектрической эффективности материала модуля Z_M , общего температурного

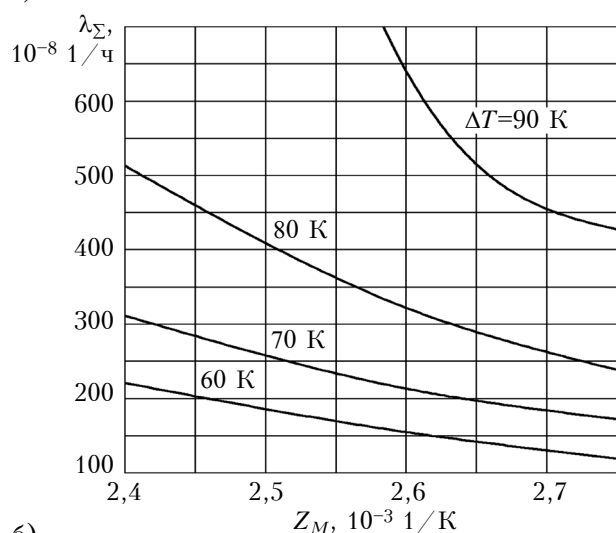
Основные значимые параметры и показатели надежности двухкаскадного ТЭУ в режимах $Q_{0\max}$ и λ_{\min} для различных значений Z_M , T_1 и ΔT при $Q_0 = 2,0$ Вт; $T = 300$ К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч; $l/S = 10$ см⁻¹

Z_M , 10 ⁻³ 1/К	Режим	B_1	B_2	Θ_1	Θ_2	n_1	n_2	n_2 / n_1	E	I , А	λ_{Σ} , 10 ⁻⁸ 1/ч	P
$\Delta T=60$ К; $T_1=267$ К												
2,40	$Q_{0\max}$	1,00	0,96	0,42	0,39	17,0	62,4	3,66	0,049	4,6	221,0	0,9780
	λ_{\min}	0,34	0,325	0,42	0,39	68,5	159,6	2,33	0,120	1,57	7,3	0,9993
2,60	$Q_{0\max}$	1,00	0,95	0,38	0,36	12,4	44,8	3,61	0,053	5,7	155,0	0,9847
	λ_{\min}	0,30	0,29	0,38	0,36	59,2	138,5	2,34	0,140	1,71	3,2	0,9997
2,75	$Q_{0\max}$	1,00	0,93	0,36	0,34	11,0	37,0	3,36	0,059	6,2	119,6	0,9881
	λ_{\min}	0,28	0,26	0,36	0,34	57,3	136,1	2,38	0,148	1,72	2,25	0,9998
$\Delta T=70$ К; $T_1=262$ К												
2,40	$Q_{0\max}$	1,00	0,95	0,55	0,47	23,9	93,5	3,92	0,0345	4,5	311,6	0,9693
	λ_{\min}	0,46	0,44	0,55	0,47	67,8	168,2	2,48	0,710	2,1	26,5	0,9974
2,60	$Q_{0\max}$	1,00	0,946	0,50	0,43	17,2	64,0	3,71	0,040	5,5	213,5	0,9789
	λ_{\min}	0,41	0,39	0,50	0,43	56,5	133,2	2,35	0,0872	2,25	13,0	0,9987
2,75	$Q_{0\max}$	1,00	0,956	0,465	0,40	13,6	50,2	3,69	0,044	6,2	172,4	0,983
	λ_{\min}	0,38	0,36	0,465	0,40	48,4	108,8	2,25	0,105	2,35	7,75	0,9992
$\Delta T=80$ К; $T_1=256$ К												
2,40	$Q_{0\max}$	1,00	0,92	0,70	0,57	39,9	172,8	4,33	0,020	4,4	513,1	0,9500
	λ_{\min}	0,62	0,57	0,70	0,57	77,0	247,0	3,20	0,032	2,74	116,0	0,9885
2,60	$Q_{0\max}$	1,00	0,92	0,64	0,52	26,2	106,7	4,07	0,0262	5,35	322,1	0,9683
	λ_{\min}	0,56	0,51	0,64	0,52	56,9	165,6	2,91	0,0457	3,0	51,7	0,9948
2,75	$Q_{0\max}$	1,00	0,91	0,59	0,49	20,8	80,5	3,87	0,0314	5,7	238,6	0,9764
	λ_{\min}	0,50	0,45	0,59	0,49	53,3	150,3	2,82	0,0554	2,9	28,7	0,9971
$\Delta T=90$ К; $T_1=250$ К												
2,40	$Q_{0\max}$	1,00	0,92	0,89	0,68	122,7	644,5	5,25	0,0065	4,25	1841,4	0,8320
	λ_{\min}	0,83	0,76	0,89	0,68	166,5	744,2	4,47	0,007	3,53	1058,0	0,8996
2,60	$Q_{0\max}$	1,00	0,88	0,79	0,64	51,5	248,6	4,83	0,0128	5,0	640,4	0,9380
	λ_{\min}	0,71	0,62	0,79	0,64	85,8	365,1	4,25	0,016	3,6	245,4	0,9758
2,75	$Q_{0\max}$	1,00	0,90	0,73	0,59	34,1	153,5	4,50	0,0177	5,57	427,6	0,9580
	λ_{\min}	0,64	0,58	0,73	0,59	64,7	230,8	3,57	0,0251	3,57	116,4	0,9885

перепада на ТЭУ ($\Delta T = T - T_0$) и промежуточной температуры T_1 для указанных исходных данных (l/S — отношение длины термоэлемента к площади его сечения). Исследования проводились для двух экстремальных токовых режимов — максимальной холодопроизводительности (Q_{\max}) и минимальной интенсивности отказов (λ_{\min}), которые максимально отличаются величиной λ_{Σ} . При проведении расчетов считалось, что в обоих каскадах используются термоэлектрические материалы с одной и той же эффективностью, а диапазон ее изменения ограничился максимально возможным на данный момент значением $2,75 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$.

Анализ расчетных данных показал, что при фиксированных значениях ΔT в диапазоне от 60 до 90 К увеличение термоэлектрической эффективности в интервале $(2,4 - 2,75) \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$

а)



б)

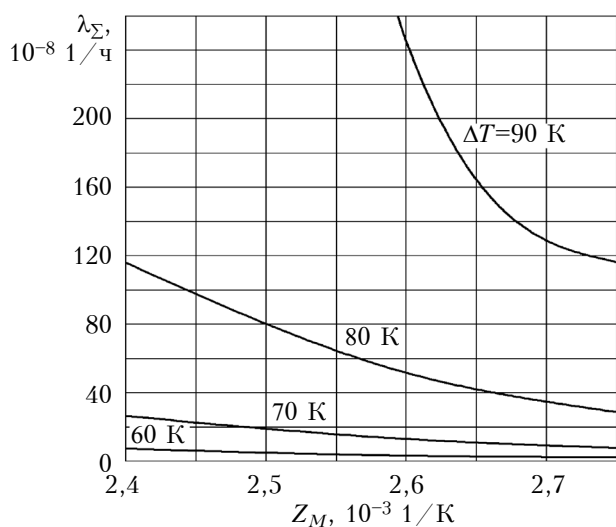
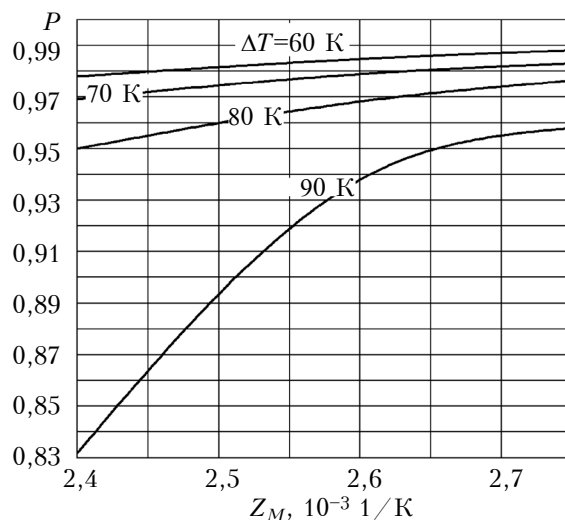


Рис. 1. Зависимость интенсивности отказов двухкаскадного ТЭУ от усредненного значения термоэлектрической эффективности материала модулей в режимах $Q_{0\max}$ (а) и λ_{\min} (б) для различных значений ΔT при $T=300 \text{ К}$ и $Q_0=2,0 \text{ Вт}$

при $T=300 \text{ К}$ приводит к тому, что параметры каскадов и ТЭУ в целом изменяются следующим образом:

- увеличивается максимальный перепад температуры: $\Delta T_{\max 1}$ на 18–23%; $\Delta T_{\max 2}$ на 16%;
- уменьшается относительный перепад температуры: θ_1 на 14–18%; θ_2 на 14%;
- уменьшается относительный рабочий ток: в режиме $Q_{0\max}$ B_2 на 1–3% ($B_1=1,0=\text{const}$); в режиме λ_{\min} B_1 на 17–23%, B_2 на 18–23%;
- увеличивается холодильный коэффициент E : в режиме $Q_{0\max}$ на 20–30%; в режиме λ_{\min} на 40–60%;
- уменьшается интенсивность отказов λ_{Σ} : в режиме $Q_{0\max}$ на 45–77%; в режиме λ_{\min} на 70–90% (рис. 1);
- увеличивается вероятность безотказной работы P (рис. 2).

а)



б)

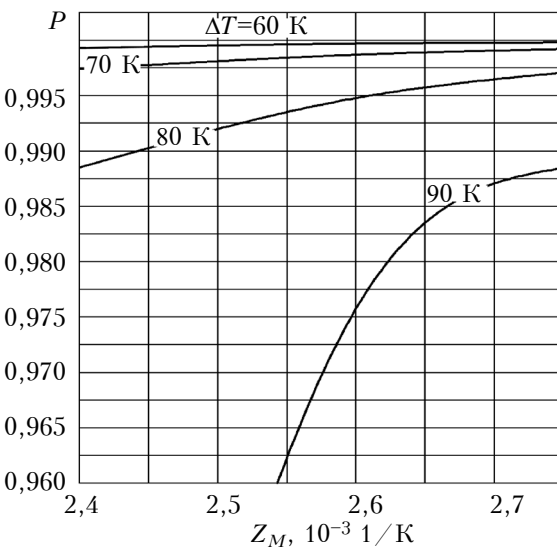


Рис. 2. Зависимость вероятности безотказной работы двухкаскадного ТЭУ от усредненного значения термоэлектрической эффективности модулей в режимах $Q_{0\max}$ (а) и λ_{\min} (б) для различных значений ΔT при $T=300 \text{ К}$; $Q_0=2,0 \text{ Вт}$; $t=10^4 \text{ ч}$

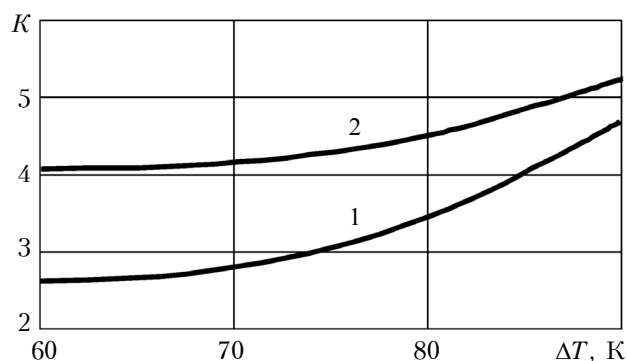


Рис. 3. Зависимость коэффициента $K = \frac{\Delta\lambda_R/\lambda_R}{\Delta Z/Z}$ от общего перепада температуры на двухкаскадном ТЭУ в режимах $Q_{0\max}$ (1) и λ_{\min} (2) при $T=300$ К; $Q_0=2,0$ Вт; $l/S=10$ см⁻¹

С ростом общего перепада температуры ΔT при заданном значении термоэлектрической эффективности материала модулей величина относительного перепада температуры в каскадах (θ_1 и θ_2) увеличивается, а максимального перепада ($\Delta T_{\max 1}$ и $\Delta T_{\max 2}$) — уменьшается. При увеличении ΔT от 60 до 90 К параметры двухкаскадного ТЭУ с $Z_M=2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К, например, изменяются следующим образом:

- увеличивается количество термоэлементов в каскадах: для режима $Q_{0\max}$ n_1 в 7,2 раза, n_2 в 10,3 раза; для режима λ_{\min} , соответственно, в 2,4 и в 4,7 раза;

- увеличивается отношение количества термоэлементов в смежных каскадах n_2/n_1 : на 43% для режима $Q_{0\max}$ и на 20% для режима λ_{\min} ;

- уменьшается холодильный коэффициент E : на 7,5% $Q_{0\max}$ и в 17 раз для режима λ_{\min} ;

- увеличивается интенсивность отказов ТЭУ λ_Σ : для режима $Q_{0\max}$ в 8,3 раза и в 144 раза для режима λ_{\min} .

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента K , отражающего взаимосвязь относительных изменений интенсивности отказов и термоэлектрической эффективности материала:

$$K = \frac{\Delta\lambda_R/\lambda_R}{\Delta Z/Z},$$

от общего перепада температуры. Кривые получены для экстремальных режимов $Q_{0\max}$ и λ_{\min} и ограничивают область, в которой расположены данные, соответствующие промежуточным токовым режимам.

Анализ приведенных на рис. 3 данных показывает, что рост термоэлектрической эффективности исходных материалов в модуле позволяет снизить интенсивность отказов ТЭУ: увеличение Z_M на 1% приводит к уменьшению λ_Σ на 2,7–4,5% в режиме $Q_{0\max}$ и на 4,1–5,2% в

режиме λ_{\min} при увеличении ΔT от 60 до 90 К. В то же время, значение коэффициента K практически не зависит от тепловой нагрузки Q_0 , т. е. относительное изменение интенсивности отказов $\Delta\lambda_\Sigma/\lambda_\Sigma$, приходящееся на один процент роста эффективности материала, одинаково для различных значений Q_0 при заданном перепаде температуры ΔT .

Следует отметить, что с ростом Q_0 пропорционально увеличивается количество термоэлементов в обоих каскадах, а следовательно, увеличивается абсолютная величина интенсивности отказов в каскадах и уменьшается вероятность безотказной работы ТЭУ.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования указывают на то, что надежность каскадных ТЭУ можно повышать параметрическим способом — увеличение эффективности термоэлектрических материалов модулей при фиксированном перепаде температуры приводит к снижению интенсивности отказов λ_Σ и увеличению вероятности их безотказной работы P в заданном режиме. Если же кроме этого выбирать режим λ_{\min} , можно дополнительно уменьшить интенсивность отказов, в некоторых случаях — на 50%.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Коленко Е. А., Стыльбанс Л. С. Термоэлектрические холодильники // Полупроводники в науке и технике. Т. 2. — Изд-во АН СССР, 1958. — С. 217–298.
2. Зайков В. П., Киншова Л. А., Казанжи Л. Д., Храмова Л. Ф. Прогнозирование показателей надежности двухкаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства в режиме $Q_{0\max}$ // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 5. — С. 34–37.
3. Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства. — Одесса: Политехперіодика, 2009.
4. Зайков В. П., Мещеряков В. И., Гнатовская А. А. Прогнозирование показателей надежности информационных систем с термоэлектрическими устройствами // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Прикладные информационные технологии. — 2011. — Т. 2, № 10(50). — С. 37–43.
5. Зайков В. П., Мещеряков В. И., Гнатовская А. А. Обеспечение наименьшей интенсивности отказов термоэлектрического устройства заданной конструкции // Вестник НТУ «ХТУ». Тем. вып. «Новые решения в современных технологиях». — Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. — № 23. — С. 78–86.
6. Зайков В. П., Мещеряков В. И., Гнатовская А. А., Журавлев Ю. И. Влияние эффективности исходных материалов на показатели надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Часть 1: Однокаскадные ТЭУ // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2015. — № 1. — С. 44–48. DOI: 10.15222/ТКЕА2015.1.44

Дата поступления рукописи
в редакцию 26.01 2015 г.

В. П. ЗАЙКОВ¹, В. И. МЕЩЕРЯКОВ²,
Ю. И. ЖУРАВЛЬОВ³

Україна, м. Одеса, ¹НДІ «Шторм»,

²Одеський державний екологічний університет, ³Одеська національна морська академія

E-mail: gradan@ua.fm

ВПЛИВ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРВИННИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ОХОЛОДЖУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ. ЧАСТИНА 2: ДВОКАСКАДНІ ТЕП

У продовження досліджень однокаскадних термоелектричних пристроїв (ТЕП) розглянуто вплив термоелектричної ефективності вихідних матеріалів модулів на показники надійності двокаскадних ТЕП. Показано, що з її ростом зменшується інтенсивність відмов і збільшується ймовірність безвідмовної роботи двокаскадного ТЕП для різних значень перепаду температури (від 60 до 90 К) і умов функціонування.

Ключові слова: термоелектричні пристрої, надійність, інтенсивність відмов, ефективність, температура, робочий струм.

DOI: 10.15222/TKEA2015.2-3.34
UDC 621.362.192

V. P. ZAYKOV¹, V. I. MESHCHERYAKOV²,
Yu. I. ZHURAVLEV³

Odessa, Ukraine, ¹Research Institute «Storm»,

²Odessa State Environmental University,

³Odessa National Maritime Academy

E-mail: gradan@ua.fm

INFLUENCE OF THE EFFECTIVENESS OF RAW MATERIALS ON THE RELIABILITY OF THERMOELECTRIC COOLING DEVICES. PART 2: TWO-STAGE THERMOELECTRIC DEVICES

Extended operation temperature range of elements and electronic equipment components using thermoelectric devices necessitates the use of cascade thermoelectric cooling devices. One of the best ways to improve the reliability of thermoelectric coolers is to improve the efficiency of thermoelectric materials.

The article presents the research results on the influence of thermoelectric efficiency of initial materials on the failure rate and probability of failure of the two-stage thermoelectric cooler within temperature range of 60 to 90 K for maximum cooling operation modes and low failure rate.

The results have shown that with the increase in the thermoelectric efficiency of the material thermocouples the maximum temperature difference in cascades increases, the working current and the ratio of the elements number in the adjoining cascades decreases (depending on the current mode in cascades of thermoelectric device from the mode of the maximum cooling capacity up to the minimum failure rate), the cooling coefficient increases, the failure rate reduces and the probability of failure-free operation of two-stage thermoelectric cooler increases.

Thus, it is shown that the increase in the thermoelectric efficiency of initial materials can significantly reduce the failure rate and increase the probability of failure-free operation of the two-stage thermoelectric devices depending on temperature difference and the current mode of operation.

Keywords: thermoelectric device, reliability, failure rate, efficiency, temperature, operating current.

REFERENCES

1. Kolenko E.A., Stil'bans L.S. [Thermoelectric coolers]. In book *Poluprovodniki v nauke i tekhnike*, vol. 2. Publ. Academy of Sciences of the USSR, 1958, pp. 217-298. (Rus)
2. Zaikov V. P., Kinshova L. A., Kazanzhi L.D., Khranova L.F. Forecasting of parameters of reliability two-cascade thermoelectrical cooling device in a mode Q_{0max} . *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2009, no 5, pp. 34-37. (Rus)
3. Zaikov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F. *Prognostirovaniye pokazatelei nadezhnosti termoelektricheskikh okhlazhdayushchikh ustroystv. Kniga 1. Odnokaskadnye ustroystva* [Forecasting performance reliability of thermoelectric cooling devices. Book 1. Single stage device]. Odessa, Politehperiodika, 2009, 118 p. (Rus)
4. Zaikov V. P., Meshcheryakov V. I., Gnatovskaya A. A. Forecasting of reliability indicators of information systems with thermoelectric devices. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2011, vol 2, no 10(50), pp. 45-47. (Rus)
5. Zaikov V. P., Meshcheryakov V. I., Gnatovskaya A. A. [Providing the lowest failure rate of the thermoelectric device specified design]. *Vestnik NTU «KhTU». Thematic iss. «Novye resheniya v sovremennykh tekhnologiyakh»*, Kharrov, 2011, no 23, pp. 78-86. (Rus)
6. Zaikov V. P., Meshcheryakov V. I., Gnatovskaya A. A., Zhuravlev Yu. I. Influence of the effectiveness of raw materials on the reliability of thermoelectric cooling devices. Part I: Single-stage TEDs. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2015, no 1, pp. 47-51. DOI: 10.15222/TKEA2015.1.44 (Rus)

К. т. н. В. А. БОЛТЕНКОВ, Г. Х. М. АЛЬ-ДЖАСРИ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: vaboltentkov@mail.ru

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

Описаны две методики оперативного контроля состояния акустических сенсорных сетей, предлагаемых для мониторинга течей теплоносителя в энергогенерирующем оборудовании. Методики основаны на создании в пределах сети звукового поля эталонного источника. В качестве тестового сигнала используется фазоманипулированный сигнал на основе М-последовательности. Работоспособность и высокие показатели качества контроля подтверждены компьютерным экспериментом.

Ключевые слова: акустическая сенсорная сеть, техническая диагностика, М-последовательность.

В последние годы особое внимание уделяется системам мониторинга течей в теплоэнергетическом оборудовании, которые выполняют функции обнаружения факта течи теплоносителя и определения места течи. Раннее обнаружение течи и ее локализация позволяют предотвратить не только потери теплоносителя, но и развитие аварийной ситуации в теплотехническом агрегате. В частности, в атомной энергетике устоявшейся является концепция «течь перед разрушением», согласно которой своевременное обнаружение и локализация течи теплоносителя на АЭС позволяет избежать масштабной аварии с разрушением основного металла АЭС [1]. Среди различных систем мониторинга течей часто применяются акустические сенсорные (микрофонные) сети [2, 3]. По сравнению с другими системами мониторинга течей (влажностными, оптическими, тепловизионными, системами, основанными на расчете массового и объемного баланса) акустические сенсорные сети (АСС) имеют ряд преимуществ, таких как [4]:

- высокая чувствительность к течи с малым расходом теплоносителя;
- простота конструкции;
- долговечность и надежность.

Действие АСС основано на обнаружении широкополосного акустического сигнала, возникающего при истечении перегретого теплоносителя через дефект в основном металле оборудования или разуплотненные фланцевые соединения. Применение пространственно разнесенных микрофонных датчиков позволяет локализовать место течи. Особенностью применения АСС является их достаточно длительная эксплуатация на большом удалении от центра обработки измерительной информации и, как правило, в до-

статочно жестких температурных и климатических условиях (помещения электрических тепловых и атомных электростанций, бойлерных и т. п., характеризующиеся высокой температурой и высокой влажностью при возникновении течи). Очевидно, что в таких условиях отказы сенсорных элементов сети неизбежны. И если полный отказ микрофона обнаруживается легко — по отсутствию выходного сигнала, то параметрический (или, по терминологии ГОСТ 27.002-89, деградационный) отказ обнаружить достаточно сложно. Такие отказы приводят к снижению качества работы АСС, причем потребитель информации продолжает пользоваться ею в расчете на полностью исправное состояние системы. То есть оперативный контроль состояния АСС в процессе их эксплуатации и выявление отказавших элементов с последующим их исключением из процесса обработки измерительной информации является весьма актуальной и важной задачей.

Известные системы оперативного контроля обычно оценивают состояние системы в целом, не позволяя установить отказавший сенсор [5]. В [6] изложены общие подходы к оценке состояния микрофонной сети, применяемой для определения местоложения источника речевого сигнала. Однако анализ литературы показывает, что реально действующие методики, позволяющие установить параметрический отказ в одном из элементов АСС, на сегодняшний день отсутствуют.

Целью настоящего исследования является разработка принципов оперативного контроля АСС для обнаружения отказавшего элемента и компьютерное моделирование практических методов контроля.

Постановка задачи

Предположим, что вероятность одновременного отказа двух и более сенсоров пренебрежимо мала, т. е. задача заключается в выявлении единичного отказавшего элемента. Акустическая сенсорная сеть S_N представляет собой N пространственно разнесенных акустических датчиков, охватывающих определенную зону пространственного мониторинга. Необходимо в пределах АСС создать эталонное звуковое поле. Для этого в технологическом помещении, где находится АСС, размещается излучатель тестового сигнала.

Приведем описание двух различных методик последовательной обработки информации, регистрируемой элементами АСС, позволяющих установить отказавший элемент.

Методика 1

Пусть на АСС падает плоская акустическая волна от источника тестового звукового сигнала. Вне зависимости от характера сигнала, для любых трех датчиков сети с номерами i, j, k , образующих треугольник, выполняется условие замкнутости [6]

$$\tau_{ij} + \tau_{jk} + \tau_{ki} = 0,$$

где $\tau_{ij}, \tau_{jk}, \tau_{ki}$ — разность времени прихода (РВП или же **TDOA** — time difference of arrival, что употребляется чаще) полезного сигнала на соответствующие пары датчиков.

В сети существует $C_N^2 = N(N-1)/2$ пар сенсоров и C_N^3 треугольников. Значения **TDOA** обычно находят по максимуму взаимно-корреляционной функции (**ВКФ**), рассчитываемой для каждой пары датчиков [7, с. 906]. Для фоновых шумов, принимаемых сенсорами, в силу их пространственной некоррелированности условие замкнутости не выполняется. Для треугольника из сенсоров с номерами i, j, k можно построить пороговую функцию

$$\Delta_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{если } \tau_{ij} + \tau_{jk} + \tau_{ki} \leq Th, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где Th — некоторый порог, в качестве которого можно выбрать среднеквадратическое отклонение отношений замкнутости от нуля для всех треугольников, образуемых N датчиками сети S_N :

$$\begin{cases} Th = \sqrt{\frac{1}{C_n^3} \sum_{i>j>k} \tau_{ijk}^2}, \\ \tau_{ijk} = \tau_{ij} + \tau_{jk} + \tau_{ki} \quad (i, j, k \in R_n). \end{cases}$$

Теперь построим индикаторную функцию

$$\text{Ind}(i, j) = \sum_k \Delta_{ijk} \quad (k \in M - \{i, j\}),$$

где M — множество номеров всех сенсоров сети.

Сформируем множество индикаторных функций для каждого сенсора сети:

$$\text{IND}(i) = \{\text{Ind}(i, j), i \in M - \{i\}, j \in M - \{i\}\}.$$

При наличии отказавшего сенсора с номером, например, l все **TDOA**, определенные при его участии, будут неверными и, соответственно, будут иметь нулевую индикаторную функцию **Ind**.

Последовательность выполнения оперативно-го контроля в соответствии с изложенным принципом следующая.

1. Создается эталонное поле тестового акустического сигнала, при этом источник сигнала должен находиться на достаточном удалении от АСС, чтобы выполнялось условие плоской волны для любой пары сенсоров.

2. Определяется **TDOA** для каждой пары сенсоров.

3. Формируется:

— пороговая функция Δ_{ijk} для каждого треугольника сети;

— индикаторная функция $\text{Ind}(i, j)$;

— множество индикаторных функций $\text{IND}(i)$.

4. По всему множеству индикаторных функций проводится поиск подмножества $\text{IND}(\text{fault})$, в котором все элементы нулевые, что и укажет на номер $l = \text{fault}$ отказавшего сенсора.

Поскольку на практике в силу конструктивных особенностей теплотехнического агрегата не всегда удается расположить излучатель тестового сигнала на достаточном удалении от АСС, чтобы выполнялось условие 1, рассмотрим другую методику.

Методика 2

Для АСС, состоящей из N приемников, для каждой четверки (пирамиды) не лежащих в одной плоскости датчиков с координатами (x_i, y_i, z_i) , (x_j, y_j, z_j) , (x_k, y_k, z_k) , (x_l, y_l, z_l) можно построить систему гиперболических уравнений [8]

$$\begin{aligned} & \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} - \\ & - \sqrt{(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2 + (z_0 - z_j)^2} = c\tau_{ij}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} - \\ & - \sqrt{(x_0 - x_k)^2 + (y_0 - y_k)^2 + (z_0 - z_k)^2} = c\tau_{ik}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} - \\ & - \sqrt{(x_0 - x_l)^2 + (y_0 - y_l)^2 + (z_0 - z_l)^2} = c\tau_{il}, \end{aligned}$$

$$i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N; k = 1, \dots, N; l = 1, \dots, N; \\ i \neq j \neq k \neq l,$$

где x_0, y_0, z_0 — известные координаты источника тестового сигнала;

c — скорость звука в воздушной среде ($c = 341$ м/с).

Из рассмотрения исключаются четверки датчиков, лежащие в одной плоскости:

$$x_i = x_j = x_k = x_l \vee y_i = y_j = y_k = y_l \vee z_i = z_j = z_k = z_l \vee i, j, k, l \in [1, \dots, N].$$

Решение системы уравнений с определением **TDOA** τ_{ij} по максимуму **ВКФ** [9] дает век-

тор координат источника тестового сигнала $\mathbf{R}(x, y, z)$. В условиях действия шумов этот вектор представляет собой статистическую оценку для каждого измерения. При известном расположении источника тестового сигнала известен вектор координат $\mathbf{R}_0(x_0, y_0, z_0)$. Тогда при многократно повторяющихся измерениях можно построить ковариационную матрицу оценки координат источника

$$\hat{\mathbf{N}}(\mathbf{R}) = [(\hat{\mathbf{R}} - \mathbf{R}_0)(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0)^T].$$

Геометрически ковариационная матрица оценки координат источника может быть интерпретирована как доверительный эллипсоид, т. е. эллипсоид, внутри которого с заданной вероятностью укладываются все случайные оценки вектора $\mathbf{R}(x, y, z)$ [10, с. 363]. Для геометрического построения доверительного эллипсоида ковариационную матрицу необходимо привести к диагональному виду:

$$\hat{\mathbf{N}}_D(\mathbf{R}) = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix},$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — соответственно, среднеквадратические ошибки оценивания координат источника x, y, z , являющиеся полуосями доверительного эллипсоида.

Для приведения матрицы к диагональному виду применим эйлерову матрицу плоских вращений [11, с. 172]:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\varphi) \mathbf{R}_y(\theta) \mathbf{R}_x(\psi),$$

где $\mathbf{R}_z(\varphi), \mathbf{R}_y(\theta), \mathbf{R}_x(\psi)$ — соответственно, вращения вокруг осей z, y, x на угол φ, θ, ψ .

Запишем матрицы вращений:

$$\mathbf{R}_z(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_x(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}.$$

Результирующая матрица вращения имеет следующий вид:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{11} & \mathbf{R}_{12} & \mathbf{R}_{13} \\ \mathbf{R}_{21} & \mathbf{R}_{22} & \mathbf{R}_{23} \\ \mathbf{R}_{31} & \mathbf{R}_{32} & \mathbf{R}_{33} \end{bmatrix},$$

а в развернутом виде она представлена внизу страницы.

Углы вращения запишем как

$$\theta = -\arcsin \mathbf{R}_{31};$$

$$\psi = \arctg \left(\frac{\mathbf{R}_{32}}{\cos \theta} / \frac{\mathbf{R}_{33}}{\cos \theta} \right);$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{\mathbf{R}_{21}}{\cos \theta} / \frac{\mathbf{R}_{11}}{\cos \theta} \right).$$

После применения к корреляционной матрице процедуры эйлеровых вращений можно построить эллипсоид вращения с полуосями $l_x = \sqrt{k\sigma_x^2}$, $l_y = \sqrt{k\sigma_y^2}$, $l_z = \sqrt{k\sigma_z^2}$ и затем найти его объем:

$$V^{\text{el}} = 4/3 \cdot \pi l_x l_y l_z.$$

Коэффициент k рассчитывается в предположении трехмерного нормального распределения ошибок оценивания координат. Вероятность того, что источник лежит внутри доверительного эллипсоида, равна

$$P^{\text{el}} = \text{erf}(\sqrt{k}/2) - (\sqrt{2k}/\pi) \cdot \exp(-K/2),$$

где $\text{erf}(\dots)$ — функция ошибок (интеграл Лапласа). Значения коэффициента функции ошибок K для различных значений доверительной вероятности приведены в табл. 1 [10, с. 365].

Во всех преобразованиях, приведенных выше, не требуется расположение тестового источника звука в дальнем поле, т. е. он может быть расположен в непосредственной близости от АСС.

Таблица 1

Вероятность, %	K
99	13,89702713
95	8,934259824
90	6,922544695
85	5,766298681
80	4,949459443
75	4,314831079

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & \sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi & \cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi \\ \cos \theta \sin \varphi & \sin \psi \sin \theta \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi & \cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi \\ -\sin \theta & \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \theta \end{bmatrix}.$$

Методика контроля для этого случая может быть реализована следующим образом.

1. Для каждой пирамиды, образованной сенсорами с номерами i, j, k, l , определяется положение источника тестового сигнала, строится ковариационная матрица, проводится ее диагонализация, рассчитывается объем доверительного эллипсоида.

2. Строится пороговая функция

$$\Delta_{ijkl} = \begin{cases} 1, & \text{если } V_{ijkl}^{\text{el}} \leq Th, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где Th — некоторый порог, в качестве которого выбирается среднеквадратическое значение доверительного эллипсоида для всех пирамид, образуемых N датчиками сети S_N :

$$Th = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{i,j,k,l} V_{ijkl}^{\text{el}}} \quad (i \neq j \neq k \neq l; i, j, k, l \in R_n),$$

где $P = C_n^4 - M_{\text{pl}}$;

M_{pl} — число четверок датчиков, лежащих в одной плоскости (исключаются из рассмотрения).

3. Формируется индикаторная функция

$$\text{Ind}(i, j, k) = \sum_l \Delta_{ijkl},$$

где $l \in M - \{i, j, k\}$, M — множество номеров всех сенсоров сети.

4. Строится множество индикаторных функций для каждого сенсора сети:

$$\text{IND}(i) = \{\text{Ind}(i, j, k), i \in M - \{i\}, j \in M - \{i\}, k \in M - \{i\}\}.$$

5. По всему множеству индикаторных функций проводится поиск подмножества $\text{IND}(\text{fault})$, в котором все элементы нулевые, что и укажет на номер $i = \text{fault}$ отказавшего сенсора.

Выбор тестового сигнала

Поскольку АСС эксплуатируются при достаточно низких значениях отношения сигнал/шум (ОСШ) (как правило, менее 5 дБ), серьезным вопросом при этом является выбор типа тестового сигнала, создающего эталонное поле. При низких значениях ОСШ требуется такой тестовый сигнал, который обеспечит достаточно узкий лепесток ВКФ и, соответственно, максимально точную оценку TDOA τ_{ij} . Поэтому в качестве эталонного сигнала предлагается использовать кодовые последовательности, называемые кодами максимальной длины или M -последовательностями [12, с. 135], и фазоманипулированные сигналы, формируемые на их основе:

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi f t + \pi/2 \cdot M(t)),$$

где A — амплитуда сигнала;

f — несущая частота;

$M(t)$ — модулирующая M -последовательность.

В качестве модулирующей обычно применяется бинарная последовательность длиной $n = 2m - 1$ элементов (m — порядок последо-

вательности), принимающая значения $\{+1, -1\}$. M -последовательность имеет узкий стрелообразный главный лепесток корреляционной функции и максимальный уровень боковых лепестков, равный $1/\sqrt{n}$.

Компьютерный эксперимент

Для подтверждения работоспособности предложенных методик был поставлен компьютерный эксперимент. В качестве моделируемой АСС была выбрана система микрофонов, предназначенная для акустической диагностики течей теплоносителя в верхнем блоке ядерного реактора ВВЭР-1000 по шуму истечения. Конфигурация сети приведена на рис. 1.

Методика 1

Для исследования методики оценим количественно условия формирования поля плоской волны на АСС. Можно показать, что при расположении источника звука на расстоянии r от приемной системы локально плоская волна в пределах характерного размера приемной системы с фазовой погрешностью, не превышающей $\lambda/16$ (λ — длина волны), образуется при $r \geq 2d^2/\lambda$. Для показанной на рис. 1 АСС при расположении источника тестового сигнала на вертикальной оси системы и послойном контроле (последовательно по каждому плоскому кольцу сенсоров) характерный размер d равен диаметру кольца (5,5 м). Полагая, что скорость звука в воздухе равна 341 м/с, при частоте тестового сигнала $f=40$ Гц получаем, что для формирования локально-плоской волны должно выполняться условие $r > 7$ м. Очевидно, что такое требование создает определенные трудности при расположении источника звука в помещении АЭС.

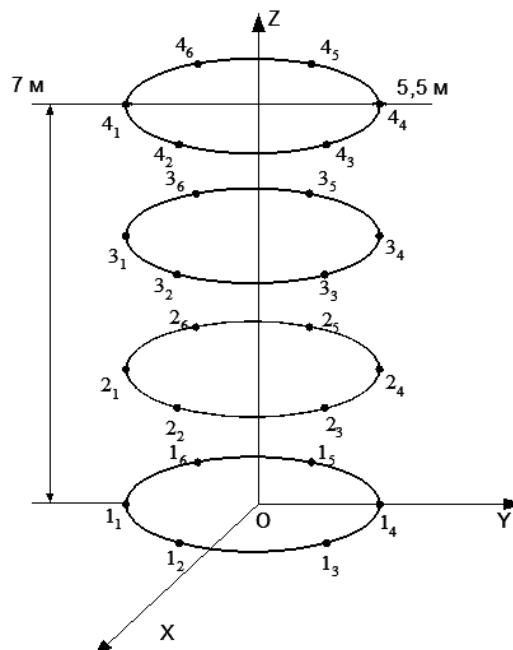


Рис. 1. Конфигурация АСС

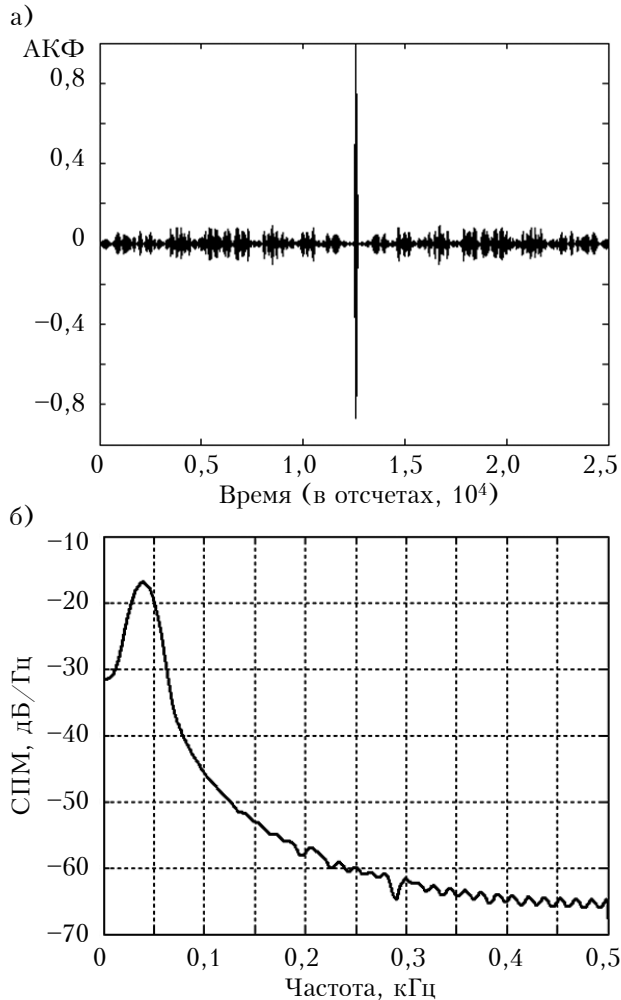


Рис. 2. Автокорреляционная функция (а) и спектральная плотность мощности (СПМ) (б) тестового сигнала для $n=127$

На рис. 2 приведены автокорреляционная функция (АКФ) тестового сигнала и его спектр по Уэлчу.

В процессе эксперимента на тестовый сигнал накладывался аддитивный гауссов белый шум. Отказавший сенсор моделировался путем замены его истинного значения TDOA во всех образуемых им с остальными сенсорами парах на случайное значение задержки в диапазоне $[-\tau_{\max}, \tau_{\max}]$, где τ_{\max} — максимально возможное значение TDOA для указанной геометрии задачи. Для каждого значения ОСШ в диапазоне от 5 до -15 дБ и случайного расположения отказавшего сенсора описанная выше процедура контроля повторялась 150 раз с различными вариантами реализации аддитивной смеси «сигнал + шум». Эксперимент показал, что при низких значениях ОСШ, когда структура фазоманипулированного сигнала практически скрыта шумом (рис. 3), максимум ВКФ достаточно хорошо выделяется, и это позволяет с достаточной точностью оценить требуемые TDOA.

Результаты эксперимента приведены в табл. 2, где под ошибкой I рода понимается признание

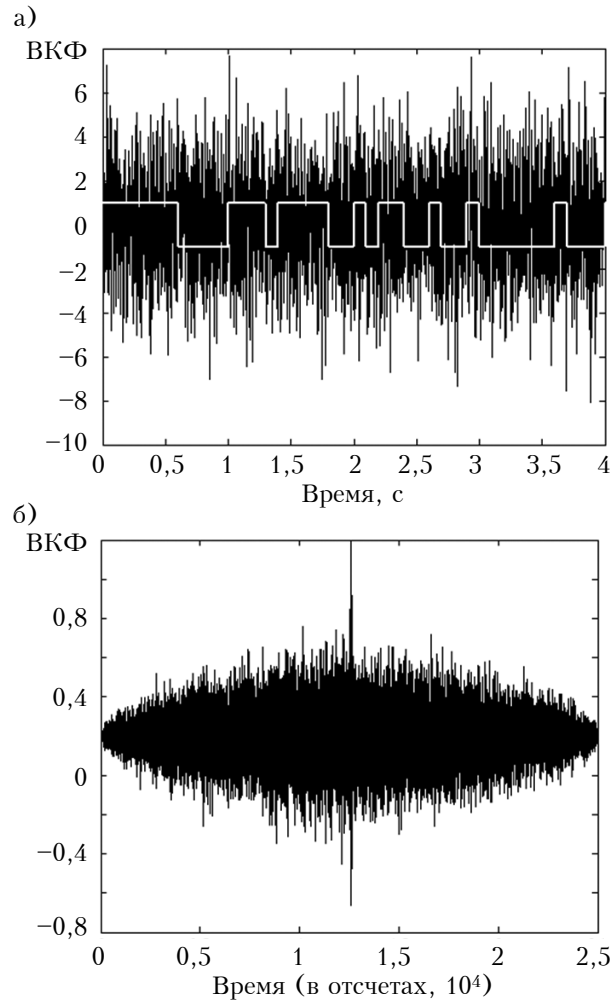


Рис. 3. Типичный вид зашумленного сигнала для низких ОСШ (слева) и ВКФ для пары сенсоров (ОСШ = -8 дБ, $n=127$)

отказавшего датчика исправным, под ошибкой II рода — признание исправного датчика отказавшим. Общее время контроля АСС на программно-аппаратной платформе CPU: Intel Core i5 2450M 2.5 ГГц; RAM: 6 ГБ DDR3 1300 МГц; ОС: Win7, Matlab 7.1 составляло 5–7 мин.

При отношениях сигнал/шум ниже -10 дБ точность оценивания TDOA резко падает для

Таблица 2
Показатели качества методики 1
в зависимости от ОСШ

ОСШ, дБ	Вероятность ошибки	
	I рода	II рода
5	0	0
0	0	0
-3	0	0
-5	0	0
-10	0,08	0,04
-15	0,17	0,04

данного тестового сигнала, и достоверность контроля становится неудовлетворительной. Все описанные модельные эксперименты были выполнены для M -последовательностей длиной от $n=31$ ($m=5$) до $n=2047$ ($m=110$). Установлено, что, начиная с $m=7$ и более, на данной несущей частоте длина последовательности практически не влияет на результативность контроля.

Методика 2

При моделировании методики 2 предполагалось, что источник тестового сигнала располагается на вертикальной оси АСС на 1 м выше верхнего кольца сенсоров. Отказ моделировался так же, как и для методики 1.

На рис. 4 приведены типичные формы доверительного эллипсоида для пирамиды из четы-

рех исправных датчиков и при отказе одного из них при ОСШ = -5 дБ и доверительной вероятности 0,95 ($K=8,934259824$). Из рисунка видно, что при параметрическом отказе одного из датчиков четверки объем доверительного эллипсоида резко увеличивается (с 0,04 до 28,36 м³).

При моделировании методики 2 было установлено, что устойчивые результаты для оценки ковариационной матрицы требуют не менее 30 испытаний для каждой четверки датчиков, и с учетом того, что $P = C_n^4 - M_{pl} \approx 7500$, общее время тестирования АСС на указанной выше программно-аппаратной платформе составляет примерно 4 ч.

Общие результаты эксперимента приведены в табл. 3.

Таблица 3
Показатели качества методики 2
в зависимости от ОСШ

ОСШ, дБ	Вероятность ошибки	
	I рода	II рода
5	0	0
0	0	0
-3	0	0
-5	0,04	0
-10	0,12	0,04
-15	0,12	0,08

Таким образом, с точки зрения реализации системы мониторинга течей на верхнем блоке ВВЭР предложенная методика 2 более предпочтительна, поскольку излучатель эталонного поля можно расположить достаточно близко к АСС. Требования и ресурсы, необходимые для создания эталонного поля, для обеих методик практически одинаковы: это размещение резервированного электродинамического излучателя в помещении АЭС и компьютерный ресурс средней производительности для решения задачи идентификации отказавшего сенсора. При работе энергоблока АЭС в базовом режиме полученная оценка времени для идентификации отказавшего сенсора вполне приемлема.

Заключение

Изложенные результаты позволяют заключить, что с помощью обеих предложенных методик оперативного контроля состояния АСС можно выявить одиночные параметрические отказы сенсоров с высокой достоверностью при достаточно малых отношениях сигнал/шум. Показатели качества контроля методик практически одинаковы, однако каждая из них имеет свои преимущества и недостатки. Так, методика 1 позволяет осуществить контроль достаточно быстро, но требует расположения тестового излучателя на большом удалении от АСС, что не

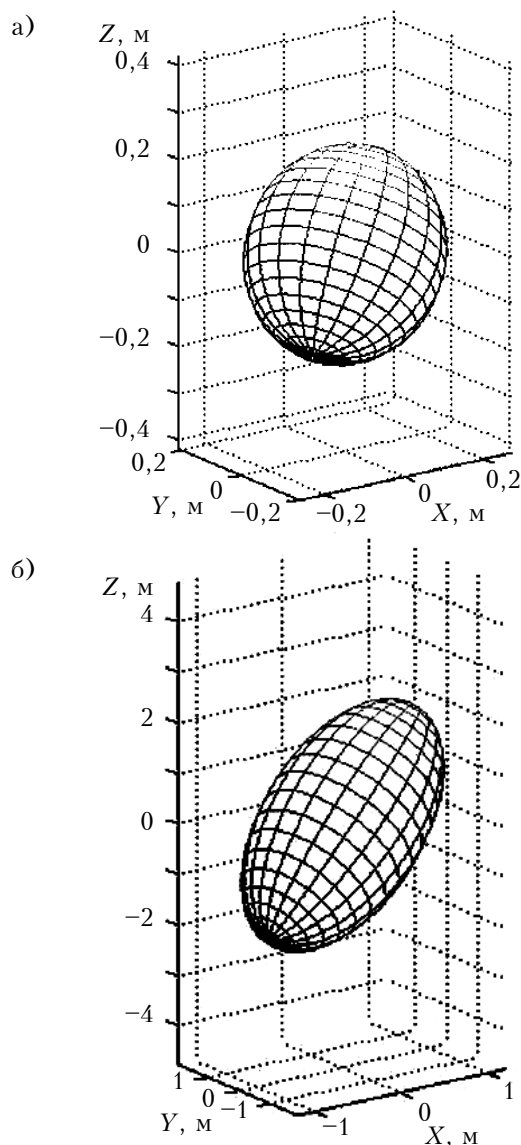


Рис.4. Типичные формы доверительного эллипсоида для пирамиды микрофонов $4_1 2_1 2_3 2_5$:

a – все микрофоны исправны ($\sigma_x=0,20$ м, $\sigma_y=0,21$ м, $\sigma_z=0,23$ м, $V^{el}=0,04$ м³); b – отказ микрофона 4_1 ($\sigma_x=1,41$ м, $\sigma_y=1,54$ м, $\sigma_z=3,76$ м, $V^{el}=28,36$ м³)

всегда возможно по технологическим соображениям. Методика 2 позволяет располагать тестовый излучатель достаточно близко, однако требует длительного времени контроля. Поэтому вопрос о применении той или другой методики должен решаться для конкретной технологической ситуации.

Дальнейшие исследования будут направлены на сокращение времени контроля, проводимого по методике 2, путем распараллеливания обработки измерительной информации, а также на проведение исследований с другими типами сложных тестовых сигналов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гетман А.Ф. Концепция безопасности (течь перед разрушением) для сосудов и трубопроводов давления АЭС. — Москва: Энергоатомиздат, 1999.
2. Geiger G. State-of-the-art in leak detection and localization // Oil and Gas European Magazine. — 2006. — N 4. — P. 193—198.
3. Huseynov J., Baliga S, Dillencourt M., Bic L., Bagherzadeh N. Gas-leak localization using distributed ultrasonic sensors // Proc. SPIE 7293 "Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems". — 2009. — 72930Z. — DOI: 10.1117/12.812058.
4. Tae-Joon K., Yughay V. S., Sung-Tai H. et al. Advantages of acoustic leak detection system development for KALIMER steam generators // Journal of the Korean Nuclear Society. — 2001. — Vol. 33, N 4 — P. 423—440.
5. Leonardi M., Gasbarra M., Galati G. Integrity monitoring for multilateration system: design and performance evaluation. // Symposium ESAVS 2010 "Enhanced Solutions for Aircraft and Vehicle Surveillance Applications". — Berlin, Germany. — 2010. — P. 273—282.
6. Pirinen T.W., Yli-Hietanen J., Pertila P., Visa A. Detection and compensation of sensor malfunction in time delay based direction of arrival estimation // Proc. International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS '2004). — Vancouver. — 2004. — P. 872—875.
7. Havelock D., Kuwano S. Vorlander M. Handbook of Signal Processing in Acoustics. — New York: Springer-Verlag, 2009. — 1950 p.
8. Болтенков В.А., Аль-Джасри Г.Х.М. Исследование акустических систем мониторинга течей теплоносителя. // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво — 2015. — № 20. — С. 16—22.
9. Болтенков В. А., Королев А. В., Максимов М. В., Маслов О. В. Алгоритмы обработки информации при акустическом бесконтактном поиске протечек на верхнем блоке реактора ВВЭР-1000 // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2009. — № 3. — С. 67—72.
10. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. — Москва: Радио и связь, 1993.
11. Лурье А.И. Аналитическая механика. — Москва: Физматлит, 1961.
12. Ipatov V.P. Spread spectrum and CDMA. Principles and applications. — N.Y.: John Willy & Sons, 2004.

Дата поступления рукописи
в редакцию 28.04 2015 г.

В. О. БОЛТОНКОВ, Г. Х. М. АЛЬ-ДЖАСРИ

Україна, Одеський національний політехнічний університет
Email: vaboltentkov@mail.ru

ОПЕРАТИВНИЙ КОНТРОЛЬ СТАНУ АКУСТИЧНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Описано дві методики оперативного контролю стану акустичних сенсорних мереж, що пропонуються для моніторингу течі теплоносія в енергогенеруючому обладнанні. Методики засновані на створенні в межах мережі звукового поля еталонного джерела. Як тестовий використовується фазоманіпульований сигнал на основі М-последовності. Працездатність і високі показники якості контролю підтверджені комп'ютерним експериментом.

Ключові слова: акустична сенсорна мережа, технічна діагностика, М-последовність.

DOI: 10.15222/TKEA2015.2-3.39
UDC 621.313:004.9

V.A. BOLTENKOV, G. Kh. M. AL-JASRI

Ukraine, Odessa National Polytechnic University
Email: vaboltentkov@mail.ru

OPERATIONAL MONITORING OF ACOUSTIC SENSOR NETWORKS

Acoustic sensor networks (ASN) are widely used to monitor water leaks in the power generating systems. Since the ASN are used in harsh climatic conditions the failures of microphone elements of ASN are inevitable. That's why the failure detection of ASN elements is a problem of current interest. Two techniques of operational monitoring ASN are developed. Both of them are based on the placement of the test sound source within a network. The signal processing for ASN sensors had to detect the failed element. Techniques are based time difference of arrival (TDOA) estimating at the each pair of ASN elements. TDOA estimates as argmaximum of cross-correlation function (CCF) for signals on each microphone sensors pair. The M-sequence phase-shift keyed signal is applied as a test acoustic signal to ensure high accuracy of the CCF maximum estimation

at low signal/noise ratio (SNR). The first technique is based on the isolation principle for TDOA sum at three points. It requires to locate the test sound source in the far field. This is not always possible due to technological reasons. For the second proposed technique test sound source can be located near the ASN. It is based on a system of hyperbolic equations solving for each of the four elements of the ASN. Both techniques have been tested in the computer imitation experiment. It was found that for the SNR to -5 dB both techniques show unmistakable indicators of control quality. The second method requires significantly more time control.

Keywords: acoustic sensor network, technical diagnostics, the M-sequence.

REFERENCES

1. Getman A.F. *Kontseptsiya bezopasnosti (tech' pered razrusheniem) dlya sudov i truboprovodov davleniya AES* [«Leak Before Break» Safety Concept for NPP Pressure Vessels and Piping]. Moscow, Energoatomizdat, 1999, 256 p. (Rus)
2. Geiger G. State-of-the-Art in Leak Detection and Localization. *Oil and Gas European Magazine*, 2006, no 4, pp. 193-198.
3. Huseynov J., Baliga S., Dillencourt M., Bic L., Bagherzadeh N. Gas-leak Localization Using Distributed Ultrasonic Sensors. *Proc. SPIE 7293 "Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems"*, 2009, 72930Z. DOI:10.1117/12.812058.
4. Tae-Joon K., Yughay V. S., Sung-Tai H., Kyung-Chai J., Jong-Hyeun C. Advantages of Acoustic Leak Detection System Development for KALIMER Steam Generators. *Journal of the Korean Nuclear Society*, 2001, vol. 33, no. 4, pp. 423-440.
5. Leonardi M., Gasbarra M., Galati G. Integrity monitoring for multilateration system: design and performance evaluation. *Symposium ESAVS 2010, Enhanced Solutions for Aircraft and Vehicle Surveillance Applications*, Berlin, Germany, 2010, pp. 273-282.
6. Pirinen T. W., Yli-Hietanen J., Pertila P., Visa A. Detection and compensation of sensor malfunction in time delay based direction of arrival estimation. *Proc. of the 2004 International Symposium on Circuits and Systems ISCAS '2004*, Vancouver, 2004, pp. 872-875.
7. Havelock D., Kuwano S., Vorlander M. *Handbook of Signal Processing in Acoustics*, New York, Springer-Verlag, 2009, 1950 p.
8. Boltenev V.A., Al-Jasri G. K. M. [The study of acoustic coolant leak monitoring systems]. *Komp'yuterno-intehrovani tekhnolohiyi: osvita, nauka, vyrobnytstvo*, 2015, no. 20, pp. 16-22. (Rus)
9. Boltenev V. A., Korolev A. V., Maksimov M. V., Maslov O. V. [Information processing algorithms for acoustic contactless finding leaks on the upper block of the VVER-1000]. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2009, no. 3, pp. 67-72. (Rus)
10. Chernyak V.S. *Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya* [The Multiposition Radar]. Moscow, Radio i Svyaz', 1993, 416 p. (Rus)
11. Lurje A.I. *Analiticheskaya mekhanika* [The Analytical Mechanics]. Moscow, Fizmatlit, 1961, 824 p. (Rus)
12. Ipatov V.P. *Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications*, N.Y., John Wiley & Sons, 2004, 398 p.

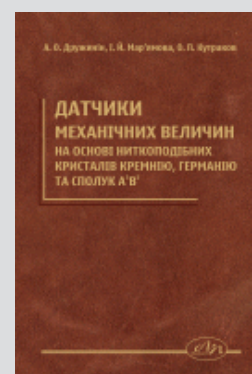
НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П. Датчики механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук A_3B_5 .— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

Проаналізовано фізичні основи створення напівпровідникових тензорезистивних датчиків механічних величин. Наведено характеристики тензорезисторів на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук A_3B_5 та результати досліджень впливу електронного опромінення на властивості ниткоподібних кристалів кремнію. Розглянуто технологічні основи виготовлення датчиків механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію для різних температурних діапазонів, а також їх конструктивні особливості. Описано датчики тиску різного призначення та їхні характеристики, а також датчики зусилля і прискорення. Розглянуто можливості створення багатофункційних датчиків для вимірювання механічних і теплових величин.

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



К. ф.-м. н. В. Р. КОЛБУНОВ, д. ф.-м. н. А. С. ТОНКОШКУР, Е. В. АНТОНОВА

Украина, Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара

E-mail: kolbunov_vadim@i.ua

СТРУКТУРА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ВАНАДИЯ И ИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА В ДИАПАЗОНЕ РАДИОЧАСТОТ

Исследованы диэлектрические свойства композитов «полиэтилен — диоксид ванадия» с объемной долей наполнителя от 10 до 30% в диапазоне радиочастот и интервале температуры 20–60°C. Показано, что наблюдаемая дисперсия диэлектрической проницаемости может быть обусловлена максвелловским разделением носителей заряда в частицах полупроводникового наполнителя. Проведенный анализ зависимости низкочастотной диэлектрической проницаемости от объемной доли наполнителя позволил установить, что исследованный композит относится к двухкомпонентным статистическим смесям с наличием переходного слоя между компонентами.

Ключевые слова: полимерный композит, диоксид ванадия, диэлектрическая проницаемость.

Полимерные композиты с активными наполнителями в последнее время рассматриваются как перспективные материалы для создания новых функциональных приборов с управляемыми свойствами и интенсивно исследуются [1–5]. В частности, на основе этих материалов могут изготавливаться самовосстанавливающиеся предохранители, которые кроме защиты от токовых перегрузок и высоких температур могут реализовывать отключение питающего напряжения при низких температурах [6–8].

Для этого типа двухкомпонентных систем диэлектрические исследования являются одним из наиболее эффективных методов изучения особенностей структуры и механизмов формирования электропроводности. Особый интерес вызывает изучение зависимости их электрической проводимости и диэлектрической проницаемости от концентрации (объемной доли) наполнителя. Результаты таких исследований позволяют анализировать проявление перколяционных явлений, связанных с образованием переходных фаз, отличных по своим физическим свойствам от исходных компонентов композитов [1, 9–11].

В настоящей работе приведены результаты исследований влияния объемной доли наполнителя — микрокристаллического диоксида ванадия — на структуру и свойства полимерного композита, перспективного для создания самовосстанавливающихся предохранителей с отключением при низких температурах. Исследования проводились при температурах ниже фазового перехода «полупроводник — металл» в диапазоне радиочастот.

Образцы и методика исследований

Исходными компонентами композита были микрокристаллический диоксид ванадия (VO_2),

полученный методом восстановления пентаоксида ванадия (V_2O_5) углеродом [12], и полиэтилен высокого давления LDPE (15803–020).

Процесс синтеза композитов «полиэтилен — VO_2 » проводился по технологической схеме, сходной с технологией изготовления самовосстанавливающихся предохранителей типа PolySwitch [6, 7].

Образцы композита имели цилиндрическую форму с диаметром основания 10 мм и высотой около 1 мм. Объемная доля наполнителя p_{VO_2} варьировалась от 10 до 30 объемных процентов.

Для изучения микроструктуры материала образцы композита охлаждали в жидком азоте и затем раскалывали, а для повышения электропроводности поверхности скола на нее напыляли тонкий слой серебра. Микрофотографии структуры образцов были получены на сканирующем электронном микроскопе РЭМ-106И (SELMi, Украина).

При измерении электропроводности образцов на постоянном токе использовали общепринятую методику снятия вольт-амперных характеристик с помощью двух вольтметров.

Диэлектрические характеристики были исследованы в радиочастотном диапазоне 50 кГц — 10 МГц с помощью измерителя добротности BM-560. Исследования приэлектродных явлений (возникновение переходных слоев со свойствами, отличными от свойств исследуемого композита) показали, что измеряемые электрические величины определяются объемными свойствами образцов.

Экспериментальные результаты

Типичная микроструктура исследованных образцов представлена на **рис. 1**.

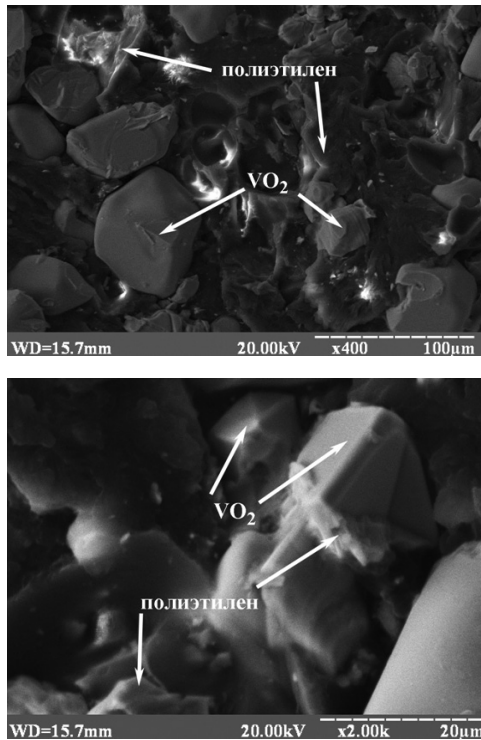


Рис. 1. Микрофотографии образца композита «полиэтилен — VO_2 » с объемным содержанием диоксида ванадия $p_{\text{VO}_2} = 0,3$

Материал композита представляет собой неоднородную систему, в которой присутствует три компонента: кристаллиты диоксида ванадия, частицы полиэтилена и поры. На фотографии кристаллиты диоксида ванадия имеют более темный оттенок и характерные резкие грани. Их размер достигает 30 мкм. Полиэтилен имеет более светлый оттенок, а его частицы заметно меньшего размера (1–5 мкм).

На **рис. 2** приведена зависимость удельной электрической проводимости на постоянном токе исследуемого композита σ_0 от объемной доли кристаллитов ванадия p_{VO_2} .

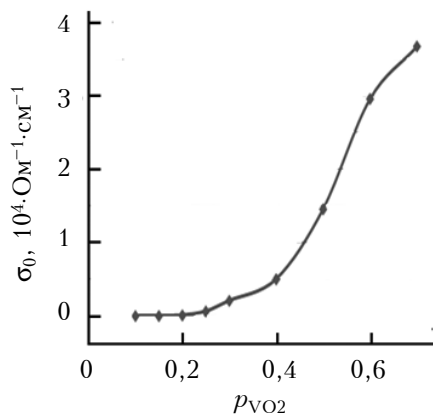


Рис. 2. Зависимость удельной электрической проводимости композита на постоянном токе от объемной доли наполнителя при температуре $T=20^\circ\text{C}$

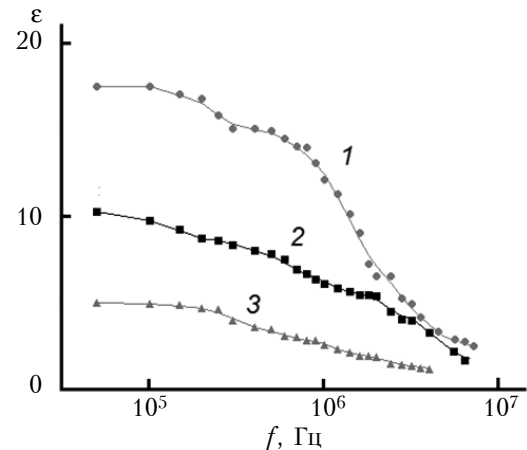


Рис. 3. Частотная зависимость ϵ образца с содержанием диоксида ванадия $p_{\text{VO}_2} = 0,1$ при различной температуре (в $^\circ\text{C}$): 1 — 20; 2 — 40; 3 — 60

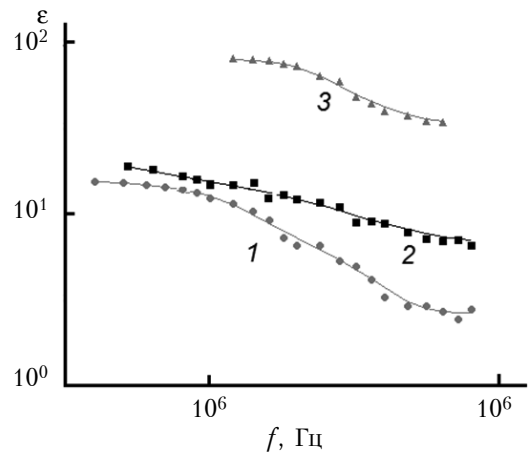


Рис. 4. Частотная зависимость ϵ образцов с различными значениями p_{VO_2} : 1 — 0,1; 2 — 0,2; 3 — 0,3

При увеличении концентрации наполнителя удельная электрическая проводимость композита возрастает до величин, характерных для электропроводности диоксида ванадия. Порог протекания в исследуемой неоднородной системе находится в диапазоне значений $p_{\text{VO}_2} = 0,3 - 0,4$. Это соответствует теоретическим представлениям о перколяционной электропроводности в таких композитах [6].

На **рис. 3**, где представлены типичные частотные зависимости относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon(f)$ образцов исследуемого композита при разных температурах, видно, что в исследуемом диапазоне частот имеет место диэлектрическая дисперсия. С ростом температуры абсолютная величина ϵ уменьшается.

Была исследована частотная зависимость относительной диэлектрической проницаемости образцов с разным содержанием диоксида ванадия при комнатной температуре (**рис. 4**). Установлено, что с ростом объемной доли полупроводникового наполнителя диэлектрическая проницаемость композита возрастает.

Экспериментальные данные, представленные на рис. 3 и 4, использовали для определения статической диэлектрической проницаемости ϵ_l . Применялась аппроксимация частотных зависимостей $\epsilon(\omega)$ формулой модели Коул—Коула с параметрами ϵ_l , ϵ_h , α , τ [13]:

$$\epsilon^*(\omega, \epsilon_l, \alpha, \tau) = \epsilon_h + \frac{\epsilon_l - \epsilon_h}{1 + (j\omega\tau)^\alpha}, \quad (1)$$

где ϵ_l , ϵ_h — низкочастотное и высокочастотное значения относительной диэлектрической проницаемости;
 τ — наиболее вероятное время диэлектрической релаксации;
 α — параметр разброса значений времени диэлектрической релаксации;
 $\omega = 2\pi f$ (f — частота переменного электрического поля);
 j — мнимая единица.

Принято, что ϵ_h может быть оценено из формул для двухкомпонентного диэлектрика (например, формулы Бруггемана [13]).

Алгоритм определения спектра указанных диэлектрических параметров основывался на минимизации функции

$$\Phi(\epsilon_l, \alpha, \tau) = \sum_{k=1}^n [\epsilon_k - \operatorname{Re}[\epsilon^*(\omega_k, \epsilon_l, \alpha, \tau)]]^2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

Индекс « k » используется для нумерации точек экспериментального спектра значений диэлектрической проницаемости.

Полученные таким способом и усредненные для нескольких однотипных образцов значения параметров спектра $\epsilon(f)$ для композита с $p_{\text{VO}_2}=0,1$ представлены в таблице.

$T, ^\circ\text{C}$	p_{VO_2}	ϵ_l	ϵ_h	$t \cdot 10^{-7}$	α
20	0,10	15,9	2,69	1,0	0,01
	0,15	20,2	2,916	1,7	0,233
	0,20	29,0	3,16	2,1	0,402
	0,25	32,7	3,41	0,78	0,186
	0,30	98,0	3,69	0,44	0,189
40	0,10	9,9	2,69	2,25	0,1
60	0,10	5,0	3,69	5,7	0,01

Анализ экспериментальных результатов

Зависимость времени диэлектрической релаксации от температуры

Параметр τ — наиболее вероятное время диэлектрической релаксации, которое найдено с помощью модели Коул—Коула, в общем случае связан с энергией активации электропроводности композита W зависимостью вида

$$\tau = \tau_0 \exp(W/(kT)), \quad (3)$$

где τ_0 — постоянная, обратно пропорциональная частоте попыток преодоления электроном потенциального барьера;

k — постоянная Больцмана.

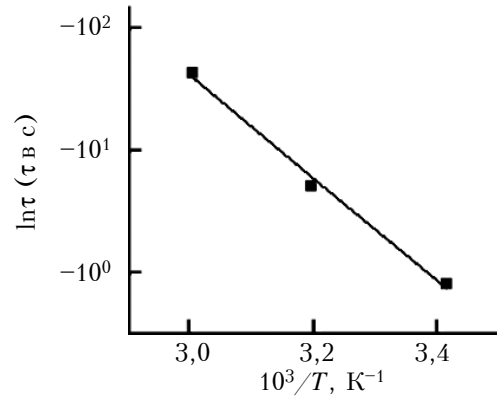


Рис. 5. Температурная зависимость ϵ для образца с содержанием диоксида ванадия $p_{\text{VO}_2}=0,1$

Учитывая выражение (3), значения τ при разных температурах можно применять для оценки энергии активации W . Температурная зависимость τ , построенная на основе приведенных в таблице данных, может быть представлена прямой линией в виде графика функции $\tau = f(10^3/T)$ (рис. 5).

В соответствии с (3) было получено, что $W=0,2-0,35$ эВ. Эти значения соответствуют энергии активации электропроводности наполнителя — микрокристаллического диоксида ванадия [14]. Этот факт, наряду с тем, что абсолютная величина диэлектрической проницаемости зависит от объемной доли полупроводникового наполнителя и с ростом частоты стремится к расчетным значениям (не учитывающим поляризацию свободного заряда), может рассматриваться как еще одно свидетельство о максвелловском механизме исследуемой диэлектрической дисперсии. В этом случае τ обратно пропорционально удельной электрической проводимости проводящей фазы композита на постоянном токе [13]: $\tau \sim \sigma_0^{-1}$. При этом $\tau_0(T) \sim \exp(-\Delta E/(kT))$, где ΔE — энергия активации проводимости микрокристаллического диоксида ванадия, согласно [14] равная 0,2—0,4 эВ.

Зависимость низкочастотной диэлектрической проницаемости от объемной доли наполнителя

Известно, что в классификации неупорядоченных дисперсных систем важную роль играет топологический фактор, согласно которому они подразделяются на матричные системы и статистические смеси [13]. Системы первого типа представляют собой сплошную среду (матрицу) с расположенными в ней дисперсными частицами. Смеси отличаются тем, что у них связующий компонент (матрица) отсутствует. С учетом перколяционного характера электропроводности (рис. 2) и топологии микроструктуры (рис. 1), исследуемые композиты в большей степени соответствуют статистическим смесям.

Для моделирования диэлектрических свойств таких смесей чаще всего применяют формулу

Бетчера – Хсу [9, 10], которая для комплексной диэлектрической проницаемости ϵ^* исследованного композита может быть записана в следующем виде:

$$\frac{\epsilon_{VO_2}^* - \epsilon^*}{\epsilon^* + (\epsilon_{VO_2}^* - \epsilon^*) \cdot A} p_{VO_2} + \frac{\epsilon_{PE}^* - \epsilon^*}{\epsilon^* + (\epsilon_{PE}^* - \epsilon^*) \cdot A} (1 - p_{VO_2}) = 0 \quad (4)$$

$$\epsilon_{VO_2}^* = \epsilon_{VO_2} + \frac{\sigma_{VO_2}}{j\omega\epsilon_0},$$

где ϵ_{VO_2} , ϵ_{PE} — относительные диэлектрические проницаемости диоксида ванадия и полиэтилена соответственно;

σ_{VO_2} — удельная электрическая проводимость диоксида ванадия на постоянном токе;

A — деполаризационный фактор частицы, которая имеет форму эллипсоида, вдоль направления приложенного электрического поля (для сферических частиц $A=1/3$).

Для низкочастотной диэлектрической проницаемости статистической смеси ϵ_l из формулы (4) можно получить

$$\epsilon_l = \epsilon_{PE} \frac{A}{A - p_{VO_2}}, \quad (5)$$

При выводе этой формулы учтено, что $\epsilon_{VO_2}^* \rightarrow \infty$ при $\omega \rightarrow 0$.

Как видно из (5), при $p_{VO_2} \rightarrow A$ низкочастотная диэлектрическая проницаемость статистической смеси бесконечно возрастает, т. е. значение $p_{VO_2} = p_C = A$ является пороговым.

На **рис. 6** представлена типичная экспериментальная зависимость низкочастотной диэлектрической проницаемости исследованных композитов от величины объемной доли диоксида ванадия p_{VO_2} , в координатах, где теоретическая зависимость (5) изображается прямой линией.

Неизвестным параметром в (5) является величина A , соответствующая пороговому значению p_C . При анализе зависимости $\epsilon_l(p_{VO_2})$ условиями вы-

бора значения p_C были, как и в [10], возможность представления экспериментальной зависимости $\lg \epsilon_l$ от $\lg(p_C - p_{VO_2})$ прямой линией в диапазоне значений объемных долей $p_{VO_2} < p_C$ и близость тангенса угла ее наклона к единице. В результате было получено значение $p_C \approx 0,34$, для которого тангенс угла наклона $\Delta \lg(\epsilon_{Xl}) / \Delta \lg(p_C - p_{VO_2})$ равен примерно 1,00, а линейный коэффициент корреляции [15] — 0,982 (рис. 6). Как видно, указанное значение p_C удовлетворительно согласуется с значениями, полученными из соответствующей зависимости для электропроводности на постоянном токе (рис. 2), и с существующими общими представлениями для неоднородных структур рассматриваемого типа [9, 10, 16].

Следует отметить результаты, полученные из аналогичного анализа, проведенного на основе модели матричной системы (где матрица — полиэтилен). Выражение для низкочастотной диэлектрической проницаемости, полученное в рамках интегральной формулы Бруггемана — Ханана для матричной системы [9], может быть записано в виде $\epsilon_l = \epsilon_{PE} / (1 - p_{VO_2})^{1/A}$. Эта формула также позволила спрyamить экспериментальную зависимость $\lg(\epsilon_l)$ от $\lg(1 - p_{VO_2})^{-1/A}$ при близком к единице линейном коэффициенте корреляции. Однако полученное значение параметра деполаризационного фактора $A \approx 0,22$ соответствует эллипсоидальным частицам наполнителя [17], вытянутым вдоль оси, перпендикулярной электродам образцов, что, как видно, не согласуется с микроструктурой исследуемого композита (рис. 1) и общими представлениями о композитах как неупорядоченных структурах [9, 10].

Сравнение технологической объемной доли наполнителя с определенной из диэлектрических измерений

Полученные данные диэлектрических измерений были применены для получения теоретической оценки объемной доли p_{EXR} с использованием формулы $p_{EXR} = p_C (1 - \epsilon_{PE} / \epsilon_l)$, выведенной из (5).

Как видно из **рис. 7**, величины p_{EXR} значительно превышают значения технологической объемной доли наполнителя p_{VO_2} , причем с ро-

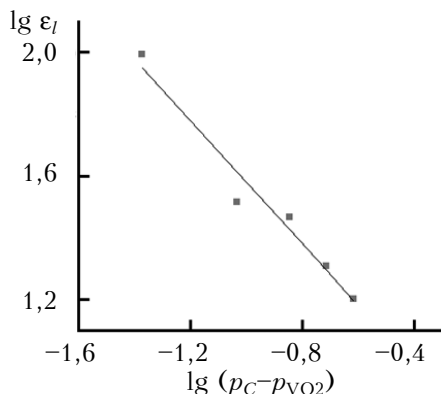


Рис. 6. Экспериментальная (точки) и теоретическая (линия) зависимости $\epsilon_l(p_{VO_2})$ в соответствии с моделью Бетчера – Хсу ($T=20^\circ\text{C}$)

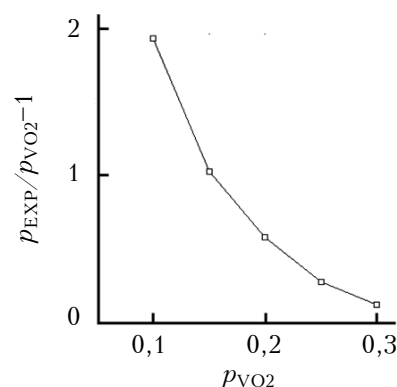


Рис. 7. Связь между технологически выдержанной объемной долей наполнителя p_{VO_2} и значением p_{EXR} , полученным из диэлектрических измерений

стом последней значения $\rho_{\text{ЕХР}}$, получаемые из диэлектрических измерений, уменьшаются. Такой эффект может быть интерпретирован в рамках представлений об образовании переходного слоя в областях полиэтиленовой матрицы, которая контактирует с частичками полупроводникового наполнителя. Образование таких переходных слоев допускалось в композитах с полимерной матрицей и проводящими наполнителями [1, 8, 18]. В соответствии с [8], переходной слой имеет локализованные электронные состояния, на которые могут туннелировать электроны из частиц проводящего наполнителя. Таким образом, область пространства, где возможно перемещение свободных носителей заряда, возрастает. Это приводит к значительному увеличению диэлектрической проницаемости композита.

С ростом количества частиц наполнителя (технологической объемной доли) свободный объем, который может занять переходной слой, уменьшается, что и отображает убывающая с ростом ρ_{VO_2} зависимость на рис. 7.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что дисперсия диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 10^5 – 10^7 Гц может быть интерпретирована в рамках максвелловского механизма миграционной поляризации, связанного с разделением свободных носителей заряда в частицах диоксида ванадия, находящегося в полупроводниковом состоянии.

С ростом температуры наблюдается:

- уменьшение абсолютных значений относительной диэлектрической проницаемости, что может быть обусловлено расширением полиэтиленовой матрицы;

- уменьшение времени диэлектрической релаксации за счет увеличения электрической проводимости полупроводникового наполнителя.

Доказано, что зависимость низкочастотной диэлектрической проницаемости от объемной доли наполнителя может быть интерпретирована в рамках модели статистической смеси с учетом образования переходного проводящего слоя. Этот результат позволяет более достоверно прогнозировать электрические свойства исследуемого материала, основываясь на перколяционном механизме его электропроводности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Годжаев Э.М., Магеррамов А.М., Сафарова С.И. и др. Диэлектрические свойства полимерных композитов с полупроводниковым наполнителем TlInSe // Электронная обработка материалов. – 2008. – № 6. – С. 66–70.
2. Гасанли Ш.М., Иманова А.Я., Самедова У.Ф. Электрические свойства тонкопленочных композитов на

основе кремния и полипропилена // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45, № 8. – С. 1117–1020. DOI: 10.1134/S1063782611080070

3. Ляшков А.Ю., Тонкошкур А.С. Варисторные композиты с положительным температурным коэффициентом сопротивления // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, № 3. – С. 112–113. – DOI: 10.1134/S1063784211030121

4. Курбанов М.А., Сулейманов Г.З., Сафаров Н.А. и др. Эффект гашения электропроводности в композитах полимер-ферроцен // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45, вып. 4. – С. 510–517. – DOI: 10.1134/S1063782611040130

5. Aneli J., Zaikov G., Mukbaniani O. Physical principles of the conductivity of electrical conducting polymer composites (review) // Molecular crystals and liquid crystals. – 2012. – Vol. 554, iss. 1. – P. 167–187. – DOI: 10.1080/15421406.2012.633866

6. Antonova K.V., Kolbunov V.R., Tonkoshkur A.S. Structure and properties of polymer composites based on vanadium dioxide // Journal of Polymer Research. – 2014. – Vol. 21, N 5. – P. 1–5. – DOI: 10.1007/s10965-014-0422-7

7. Pat. 19970130 US5747147 USA. Conductive polymer composition and device / M. F. Wartenberg, J. G. Lahlouh, James Toth. – 05.05.98.

8. Degtyar'ov A.V., Tonkoshkur A.S. Electric conductivity of PTCR polyethylene – graphite composites // Ukrainian Journal of Physics. – 2007. – Vol. 52, N 9. – P. 863–867.

9. Banhegyi G. Numerical analysis of complex dielectric mixture formulae // Colloid & Polymer Science. – 1988. – Vol. 266, N 1. – P. 11–28. – DOI: 10.1007/BF01451527

10. Soon-Gi Shin¹ and In-Kyu Kwon. Effect of temperature on the dielectric properties of carbon black-filled polyethylene matrix composites below the percolation threshold // Electronic Materials Letters. – 2011. – Vol. 7, N 3. – P. 249–254. – DOI: 10.1007/s13391-011-0913-1

11. Degtyar'ov A.V., Tonkoshkur A.S., Lyashkov A.Yu. Electrical properties of posistor composite materials based on polyethylene-graphite // Multidiscipline Modeling in Materials and Structures. VSP. – 2006. – Vol. 2, N 4. – P. 435–441.

12. Ивон А.И., Колбунов В.Р., Черненко И.М. Получение кристаллического диоксида ванадия (IV) восстановлением оксида ванадия (V) углеродом // Вопросы химии и химической технологии. – 2004. – № 2. – С. 68–72.

13. Тонкошкур О.С., Игнаткин В.У. Фізичні основи електричного контролю неоднорідних систем. – Дніпропетровськ: ДДТУ, 2010.

14. Kolbunov V.R., Ivon A.I., Chernenko I.M. Conductivity of VO_2 -based ceramics // Journal of materials science: materials in electronics. – 2006. – Vol. 17, N 1. – P. 57–62. – DOI: 10.1007/s10854-005-5142-7

15. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. – Москва: Высшая школа, 1985.

16. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. – Москва: Наука, 1979.

17. Духин С.С., Шилов В.Н. Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах. – Киев: Наукова думка, 1972.

18. Рассоха А.Н., Черкашина А.Н., Храмова Т.И. Влияние природы межфазного слоя на свойства фураноэпоксидных композитов // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2011. – №2. – С. 124–128.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 21.02 2015 г.*

В. Р. КОЛБУНОВ, О. С. ТОНКОШКУР, Є. В. АНТОНОВА

Україна, Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара
E-mail: kolbunov_vadim@i.ua

**СТРУКТУРА ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ВАНАДІЮ
ТА ЇХ ДІЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ В ДІАПАЗОНІ РАДІОЧАСТОТ**

Досліджено діелектричні властивості композитів «поліетилен — діоксид ванадію» з об'ємною часткою наповнювача від 10 до 30% в діапазоні радіочастот та інтервалі температури 20–60°C. Показано, що спостерігається дисперсія діелектричної проникності, що може бути обумовлено максвелловським розділенням носіїв заряду в частинках напівпровідникового наповнювача. Проведений аналіз залежності низькочастотної діелектричної проникності від об'ємної частки наповнювача дозволив встановити, що досліджений композит належить до двокомпонентних статистичних сумішей з наявністю перехідного шару між компонентами.

Ключові слова: полімерний композит, діоксид ванадію, діелектрична проникність.

DOI: 10.15222/TKEA2015.2-3.47

V.R. KOLBUNOV, A.S. TONKOSHKUR, K.V. ANTONOVA

UDC 621.317: 538.956

Ukraine, Oles Gonchar Dnepropetrovsk National University

E-mail: kolbunov_vadim@i.ua

STRUCTURE AND DIELECTRIC PROPERTIES IN THE RADIO FREQUENCY RANGE OF POLYMER COMPOSITES BASED ON VANADIUM DIOXIDE

Polymer composites with active fillers are recently considered to be promising materials for the design of new functional devices with controllable properties and are intensively investigated. Dielectric studies are one of the most effective methods for studying structural features and mechanisms of conductivity formation for this type of two-component systems. The paper presents research results of the dielectric characteristics in the range of radio frequency of 50 kHz – 10 MHz and temperature range of 30–60°C of polyethylene composites of vanadium dioxide with different volume fractions of filler. Two dispersion areas were found: a high-frequency area caused by the Maxwell charge separation on the boundaries of the polyethylene matrix – conductive filler of VO₂ crystallites, and a low frequency area associated with the presence of the transition layer at this boundary. The relative permittivity of the composite has a tendency to a decrease in absolute value with increasing temperature. The analysis of the low-frequency dependence of the dielectric constant of the value of the filler's volume fraction revealed that the investigated composite belongs to two-component statistical mixtures with a transition layer between the components.

Keywords: polymer composite, vanadium dioxide, dielectric permittivity.

REFERENCES

1. Godzhaev E.M., Magerramov A.M., Safarova S.I., Nuriev M.A., Ragimov R.S. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2008, no 6, pp. 66-70. (Rus)
2. Gasanli Sh.M., Imanova A.Y., Samedova U. F. Electrical properties of thin-film composites based on silicon and polypropylene. *Semiconductors*, vol. 45, iss. 8, pp. 1085-1088. DOI: 10.1134/S1063782611080070
3. Lyashkov A.Yu., Tonkoshkur A.S. Varistor composites with a positive temperature coefficient of resistance. *Technical Physics*. vol. 56, iss. 3, pp. 427-428. DOI: 10.1134/S1063784211030121
4. Kurbanov M.A., Suleymanov G.Z., Safarov N.A., Gochuyeva A.F., Orujov I.N., Mamedova Z.M. Conductivity photoquenching effect in polymer–ferrocene composites. *Semiconductors*, vol. 45, iss. 4, pp. 503-509. DOI: 10.1134/S1063782611040130
5. Aneli J., Zaikov G., Mukbaniani O. Physical principles of the conductivity of electrical conducting polymer composites (review). *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2012, vol. 554, iss. 1, pp. 167-187. DOI:10.1080/15421406.2012.633866
6. Antonova K.V., Kolbunov V.R., Tonkoshkur A.S. Structure and properties of polymer composites based on vanadium dioxide. *Journal of Polymer Research*, 2014, vol. 21, no 5, pp. 1-5. DOI: 10.1007/s10965-014-0422-7
7. Wartenberg M. F., Lahlouh J. G., Toth J. *Conductive polymer composition and device*. Pat. USA, no 19970130 US5747147, 1998.
8. Degtyar'ov A.V., Tonkoshkur A.S. Electric Conductivity of PTCR polyethylene – graphite composites. *Ukrainian Journal of Physics*, 2007, vol. 52, no 9, pp. 863 – 867.
9. Banhegyi G. Numerical analysis of complex dielectric mixture formulae. *Colloid & Polymer Science*, 1988, vol. 266, no 1, pp. 11-28. DOI: 10.1007/BF01451527
10. Soon-Gi Shin¹, In-Kyu Kwon. Effect of temperature on the dielectric properties of carbon black-filled polyethylene matrix composites below the percolation threshold. *Electronic Materials Letters*, 2011, vol. 7, no 3, pp. 249-254. DOI: 10.1007/s13391-011-0913-1
11. Degtyar'ov A.V., Tonkoshkur A.S., Lyashkov A.Yu. Electrical properties of posistor composite materials based on polyethylene-graphite. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. VSP, 2006, vol. 2, no 4, pp. 435-441.
12. Ivon A.I., Kolbunov V.R., Chernenko I.M. [Preparation of crystalline dioxide vanadium (IV) by reduction of vanadium oxide (V) with carbon] *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2004, no 2, pp. 68-72. (Ukr)
13. Tonkoshkur O.S., Ignatkin V.U. *Fizichni osnovi elektrichnogo kontrolyu neodnorodnikh sistem* [Physical basis of electrical control heterogeneous systems]. Dniprodzerzhyn'sk, DDTU, 2010, 290 p. (Rus)
14. Kolbunov V.R., Ivon A.I., Chernenko I.M. Conductivity of VO₂-based ceramics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2006, vol. 17, no 1, pp. 57-62. DOI: 10.1007/s10854-005-5142-7
15. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. *Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoi tekhnologii* [Methods of optimization experiment in the chemical technology]. Moscow, Vysshaya shkola, 1985, 327 p. (Rus)
16. Shklovskii B. I., Efros A. L. *Elektronnye svoystva legirovannykh poluprovodnikov* [The electronic properties of doped semiconductors]. Moscow, Nauka. 1979, 416 p. (Rus)
17. Dukhin S.S., Shilov V.N. *Dielektricheskie yavleniya i dvoinoi sloi v dispersnykh sistemakh i polielektrolitakh* [Dielectric phenomena and double layer in dispersed systems and polyelectrolytes]. Kyiv, Naukova dumka, 1972, 226 p. (Rus)
18. Rassokha A.N., Cherkashina A.N., Khramova T.I. *Integrated Technologies and Energy Conservation*. 2011, no 2, pp. 124-128. (Rus)

И. В. ДОКТОРОВИЧ, д. т. н. В. Н. ГОДОВАНЮК, В. Г. ЮРЬЕВ, к. ф.-м. н. В. Г. ЖИТАРЮК*

Украина, г. Черновцы, ЦКБ «Ритм»;

*Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

E-mail: rhythm@chv.ukrpack.net

ПРОБЛЕМЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОПРИЕМНИКОВ И НЕКОТОРЫЕ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Рассмотрены трудности, возникающие при измерении интегральной чувствительности фотоприемников в различных спектральных диапазонах (в инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях). Предложены пути решения проблем использования источников с разными спектральными характеристиками и приведены результаты исследований метрологических характеристик разработанных методик проведения таких измерений.

Ключевые слова: фотоприемники, интегральная чувствительность, фотоэлектрические параметры, проведение измерений, ИК, УФ, видимый диапазон, погрешность измерений.

Разработчики фотоприемников (ФП), предназначенных для различных спектральных диапазонов, при измерении их интегральной чувствительности зачастую сталкиваются с проблемой значительного разброса получаемых значений. Несмотря на то, что термин «интегральная чувствительность ФП» стандартизирован, собственно процедура выполнения измерений чувствительности полна неявных факторов, влияющих на результат.

Для видимой и ИК-областей существует набор стандартизованных источников излучения, и здесь возникает потребность повышения точности выполнения измерений. Эти вопросы авторы решают методически, исследуя процедуры выполнения измерений с точки зрения метрологических характеристик и вырабатывая рекомендации по измерительным установкам и применению конкретных методик. При измерениях параметров ФП проблемным в метрологическом смысле является УФ-диапазон, и возникающие при этом проблемы авторы решают, применяя нестандартные измерительные установки и методики.

В настоящей статье приведены некоторые результаты исследований, проводимых авторами в этой области, а также метрологические характеристики разработанных методик выполнения указанных измерений в различных спектральных диапазонах.

Вначале остановимся на вопросах, связанных с измерениями интегральной чувствительности ФП.

Под чувствительностью фотоприемника S понимают его реакцию на действие падающего оптического излучения — фототок или фотонапряжение на выходе ФП. При этом пада-

ющее оптическое излучение может быть задано в энергетических или световых единицах потока излучения.

В зависимости от спектрального состава излучения различают монохроматическую (S_{\square}) или интегральную ($S_{\text{инт}}$) чувствительность. Интегральная чувствительность ФП — это чувствительность ФП к немонахроматическому излучению заданного спектрального состава [1], которая определяется соотношением

$$S_{\text{инт}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{I_{\lambda}}{\Phi_{\lambda}} d\lambda, \quad (1)$$

где I_{λ} — фототок;

Φ_{λ} — падающий на ФП оптический поток излучения;

λ_1, λ_2 — начало и конец спектрального диапазона.

Поскольку интегральная чувствительность зависит от спектрального состава потока излучения, при ее определении оговаривается природа источника излучения. Стандарт, который определяет методы измерения фотоэлектрических параметров ФП, устанавливает, что тип источника излучения должен выбираться с учетом требований технических условий для конкретного типа ФП [2]. Однако разнообразие источников излучения создает серьезные проблемы при определении интегральной величины потока излучения и, соответственно, при определении интегральной чувствительности ФП. В вышеуказанном стандарте для ФП, чувствительных в инфракрасной (ИК) области спектра, в качестве источника излучения рекомендуется использовать абсолютно черное тело (АЧТ) с температурой полости 500 ± 2 или 1273 ± 15 К; для ФП, чувствительных в видимой области и в ближней инфракрасной, — лам-

пы накаливания типа СИС или РН при цветовой температуре $T_c = 2856 \pm 100$ К [2]. Что же касается ультрафиолетовой (УФ) области, то тут нет даже рекомендаций по типам излучателей, которые следует применять при измерениях.

Относительно имеющихся источников излучения можно сказать, что они либо маломощны, либо очень нестабильны [3, 4], и это представляет серьезную проблему, которая может быть решена только центральными метрологическими службами. Аналогичная ситуация и с эталонными фотоприемниками.

Теперь перейдем к рассмотрению проблем, возникающих при измерении интегральной чувствительности ФП, а также путей их решения, предназначенных для разных областей спектра.

Фотоприемники, чувствительные в средней и дальней ИК-области

К фотоприемникам, чувствительным в средней и дальней ИК-области, относятся болометры, пироэлектрические и термоэлектрические приемники, приемники Голея, приемники на основе PbS, PbSe, InSb, InAs, $Hg_{1-x}Cd_xTe$ и др. Для измерения интегральной чувствительности таких ФП применение ламп накаливания в качестве источников излучения малоэффективно, поскольку длинноволновой край пропускания их стеклянных колб ограничивается длиной волны 2,5 мкм, в этом случае необходимо использовать АЧТ. При этом следует иметь в виду, что абсолютно черное тело существует только теоретически, а на практике пользуются его моделью с коэффициентом излучения, близким к единице (как правило, не меньше 0,98). Поэтому под АЧТ будем подразумевать «серое тело» или «серый излучатель».

На сегодняшний день в мире создано большое количество разных видов конструкций АЧТ, которые отличаются своими техническими и метрологическими характеристиками. В Украине широко используют излучатели К19.532 с блоком регулирования температуры К15.742 и излучатели К21.532 с блоком К22.742. Конструктивно данные источники излучения представляют собой отдельные блоки, которые могут быть использованы при исследовании параметров ИК-фотоприемников любого типа. При измерениях параметров ФП, которые охлаждаются с помощью сжиженных газов, АЧТ крепится вертикально, при направлении потока излучения сверху вниз или снизу вверх, для других ФП — горизонтально.

Указанные источники излучения удобны для разработчиков ИК-фотоприемников. С их помощью могут быть исследованы, например, следующие характеристики:

- интегральная чувствительность в диапазоне температуры полости АЧТ от 323 до 1273 К;
- энергетическая характеристика чувствительности при изменении потока излучения от его порогового значения $\Phi_{п}$ до $10^4 \Phi_{п}$;

- нестабильность чувствительности ФП на протяжении всего времени непрерывной работы;
- частотная характеристика чувствительности при изменении частоты модуляции потока излучения от 20 Гц до 100 кГц;
- зависимость чувствительности от температуры в диапазоне от -60 до 80°C .

При исследованиях параметров ФП при модулированном потоке излучения рекомендуется использовать модулятор АДБ7.0089 с блоком питания типа Б5-45; вольтметр типа ВЗ-38, ВЗ-39 или селективный усилитель У2-8, В6-9. Для серийных ФП лучше использовать установку К54.410 с одним из вышеприведенных источников излучения (К19.532 или К21.532).

Структурная схема и основные параметры установки для измерения интегральной чувствительности ФП приведены на рис. 1 и в табл. 1 соответственно.

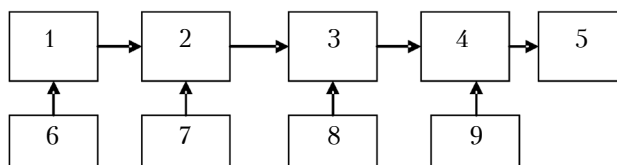


Рис. 1. Структурная схема установки для измерения фотоэлектрических параметров ФП:

1 — АЧТ; 2 — механический модулятор; 3 — исследуемый ФП в контактном устройстве; 4 — предусилитель; 5 — вольтметр; 6 — блок регулирования температуры АЧТ; 7 — блок регулирования и стабилизации частоты модуляции потока излучения; 8 — блок питания ФП; 9 — блок питания предусилителя (поз. 1, 2, 4–9 входят в состав установки К54.410)

При определении интегральной чувствительности фотоприемников широко используют метод сравнения их параметров с параметрами однотипного эталонного ФП. Например, измерив при одинаковых условиях и режимах фотосигнал с эталонного ($U_э$) и исследуемого ($U_и$) ФП, чувствительность измеряемого ($S_и$) ФП можно определить соотношением

$$S_и = S_э \frac{U_и}{U_э}, \quad (2)$$

где $S_э$ — чувствительность эталонного ФП.

Однако, поскольку чувствительность ИК ФП существенно зависит от температуры окружающей среды, напряжения питания ФП, изменений спектрального состава потока излучения и, кроме этого, изменяется со временем (так называемое старение приемника), на практике для измерения чувствительности используется аналитический метод — при известной температуре и размерах выходной диафрагмы АЧТ рассчитывается поток излучения (Φ) или энергетическая освещенность ($E_э$), которую он создает.

Энергетическая освещенность ФП рассчитывается по известным в фотометрии соотношениям, например для определения освещенности,

Основные параметры установок для измерения интегральной чувствительности ИК ФП

Параметр	Установка К54.410	Измерительная схема на базе К19.532 или К21.532
Температура полости АЧТ, °С	50 – 1000	
Размер сменных диафрагм, мм	0,6; 1,2; 2,4; 4,8; 8	0,3; 0,6; 1,2; 2,4; 4,8; 8
Энергетическая освещенность ФЧЭ* (при обеспечении точности излучения), Вт/м ²	от 1·10 ⁻⁴ до 2,5	от 1·10 ⁻⁶ до 1·10 ²
Частота модуляции потока излучения ($f_{\text{мод}}$), Гц	400; 800; 1200	от 20 Гц до 100 кГц
Резонансная частота предусилителя ($f_{\text{рез}}$), Гц		
Эквивалентная полоса пропускания предусилителя, % от $f_{\text{рез}}$	8 – 10	4 – 6
Напряжение шума при $R_n = 50$ кОм, мВ, не более	0,7	0,1
Нестабильность предусилителя через 8 ч, %, не более	2,0	2,0
Сопrotивление резисторов нагрузки в цепи ФП	от 50 до 1750 кОм	
Погрешность измерений напряжения сигнала, %, не более	±3	
Напряжение питания ФЧЭ, В	до 100	
Расстояние между АЧТ и ФЧЭ, мм	300	от 50 до 3000

* ФЧЭ – фоточувствительный элемент.

создаваемой точечным источником излучения. Напомним, что точечным считается источник, когда расстояние (L) между его диафрагмой и фоточувствительным элементом ФП значительно больше размеров (d) диафрагмы или ФЧЭ: $L \geq (5 \dots 10)d$, а распределение излучения АЧТ соответствует закону Ламберта: косинусное распределение энергетической силы света. Для АЧТ разной конструкции распределение излучения АЧТ соответствует закону Ламберта в пределах углов 5 – 10°.

В установке К54.410 конструктивно созданы условия для обеспечения точности излучения: расстояние между диафрагмой АЧТ и ФЧЭ составляет 300 мм, максимальный размер диафрагмы $d_{\text{max}} = 8$ мм, распределение излучения АЧТ соответствует закону Ламберта при диаметре светового пятна, который не превышает 50 мм.

В качестве рекомендации разработчику ИК ФП можем посоветовать: при сборке измерительной схемы (макета установки) с использованием АЧТ К19.532 или К21.532 необходимо учитывать размеры ФЧЭ ФП и диафрагмы АЧТ, чтобы обеспечить указанные условия точности излучения. Следует отметить, что такие измерительные схемы обеспечивают измерение фотоэлектрических параметров ФП в более широких, чем К54.410, диапазонах изменения условий и режимов измерений, однако их конструктивная незавершенность приводит к дополнительным затратам и неудобствам. В то же время, несмотря на то, что параметры установки К54.410 ограни-

чивают возможности ее использования при исследованиях параметров ФП, она широко используется при серийном производстве ИК ФП, поскольку является завершенным средством измерительной техники.

При выполнении требований к точности источника излучения энергетическая освещенность определяется как

$$E_e = \frac{\sigma(T^4 - T_0^4)F}{\pi L^2} \text{ [Вт/см}^2\text{]}, \quad (3)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12}$ Вт·см⁻²·К⁻⁴;

T, T_0 – значения температуры полости АЧТ и модулятора соответственно, К;

F – площадь отверстия диафрагмы АЧТ, см².

После измерения напряжения фотосигнала U (в В) можно определить интегральную чувствительность ИК ФП к излучению АЧТ по формуле

$$S_{\text{инт}} = \frac{U}{E_e K_{\text{пу}} A} \text{ [В/Вт]}, \quad (4)$$

где $K_{\text{пу}}$ – коэффициент усиления предусилителя;
 A – площадь ФЧЭ, см².

В зависимости от выбранных средств измерительной техники, режимов и условий проведения измерений основная относительная погрешность определения интегральной чувствительности при использовании рассмотренного метода находится в пределах от ±10 до ±15%.

Фотоприемники, чувствительные в видимой и ближней ИК-области

Для ФП, чувствительных в видимой и ближней ИК-областях (0,4 – 3,0 мкм), необходимы АЧТ с температурой полости не менее 3000 К. Следует отметить, что такие АЧТ являются довольно сложными, уникальными и громоздкими устройствами и никак не могут быть использованы в промышленных условиях. Поэтому в качестве АЧТ широко используют лампы накаливания с телом накаливания в виде спирали специальной формы (рис. 2), что позволяет создать высокий уровень потока излучения и равномерное световое поле в плоскости фоточувствительного элемента ФП.

В табл. 2 приведены основные параметры источников излучения, которые аттестуются метрологами в качестве рабочих средств измерительной техники и используются при измерениях интегральной чувствительности ФП.

Как уже отмечалось, значение интегральной чувствительности зависит от типа источника, поскольку это параметр, который зависит не только от свойств ФП, но и от спектральной характеристики излучения источника. На практике используют лампы накаливания, аттестованные как стандартные источники с цветовой температурой $T_{ц} = 2856$ К (источник типа А), а интегральная чувствительность ФП определяется к световому потоку. Необходимо отметить, что поскольку большинство ФП чувствительны не только к излучению видимого диапазона, но и за его пределами, использование в этом случае световых единиц приобретает условный характер, т. к. по определению они характеризуют именно видимый спектр. Однако при достаточно стабильной спектральной характеристике чувствительности ФП такая система параметров приемлема. На сегодня определение интегральной чувствительности по отношению к световому пото-

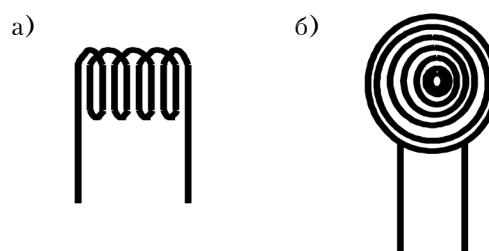


Рис. 2. Формы тел накаливания ламп типа КГМ и РН6-7.5 (а) и РН12-100 (б)

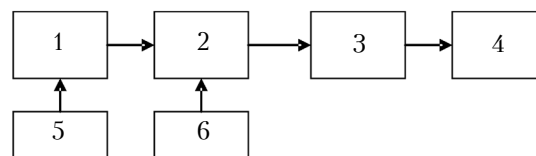


Рис. 3. Структурная схема установки для измерения интегральной чувствительности ФП:

1 – источник излучения (лампа накаливания РН12-100 с $T_{ц} = 2856$ К); 2 – измерительный ФП в контактном приспособлении; 3 – преобразователь «ток – напряжение» (ППТН-2); 4 – вольтметр (В7-34А, В7-28); 5 – блок питания лампы (Б5-21 с модулятором АДБ109.00); 6 – блок питания ФП (Б5-43)

ку стало общепринятым для фотоэлектронных умножителей, вакуумных фотоэлементов, CdS- и CdSe-фоторезисторов, Si- и Ge-фотодиодов.

Измерение интегральной чувствительности проводится с использованием источника стабильного немодулированного потока излучения и прецизионного прибора для измерения фотосигнала. Структурная схема установки изображена на рис. 3.

При неизменном размещении источника относительно ФП величина интегральной чувствительности определяется соотношением

$$S_{\text{инт}} = \frac{U}{K_{\text{пр}} \Phi} [\text{А/лм}], \quad (5)$$

Таблица 2

Основные параметры источников излучения [5, 6]

Параметр источника излучения	Тип источника излучения (лампы накаливания)				
	КГМ12-100	КГМ24-150	КГМ24-250	РН6-7.5*	РН12-100*
Цветовая температура $T_{ц}$, К	3200			2850	
Ток лампы (при $T_{ц}$), А	8,2 – 8,5	6,0 – 6,7	9,5 – 10,5	1,2 – 1,3	7,3 – 7,7
Напряжение питания, В	12	24	24	6	12
Потребляемая мощность, Вт	100	150	250	7.5	100
Сила света, кд	130 – 140	180 – 210	280 – 340	8,2 – 8,7	125 – 135
Световой поток, лм	3000	5000	8500	90	1750
Освещенность ФЧЭ (при обеспечении точности излучения), лк	$1 - 10^4$	$1 - 10^4$	$1 - 10^4$	$0,1 - 10^3$	$1 - 10^4$
Размеры тела накаливания, мм	2,3×4,0	2,9×5,8	3,5×6,5	1,0×1,5	Ø5

* Источники излучения, которые чаще других используются при измерении параметров ФП.

где $K_{пр}$ — коэффициент преобразования преобразователя [7] (в частности, ППТН-2) согласно его паспорту, В/А;

Φ — световой поток, лм.

Световой поток Φ определяется как величина, которая равна силе света лампы накаливания $I_{л}$ в телесном угле ω [8, с. 12–14]:

$$\Phi = I_{л} \omega. \quad (6)$$

При сохранении условий точечности источника излучения телесный угол ω определяется отношением площади ФЧЭ ФП к квадрату расстояния между ФП и источником. Тогда можем записать

$$\Phi = I_{л} A / L^2. \quad (7)$$

Таким образом, зная площадь ФЧЭ, расстояние между ФП и источником излучения, паспортные данные, такие как сила света лампы и коэффициент преобразования преобразователя, можно определить интегральную чувствительность ФП к излучению источника типа А.

Лампы накаливания в основном аттестуют только по цветовой температуре $T_{ц}$ или же по цветовой температуре и силе света при указанных в их паспорте режимах питания, при которых воспроизводится $T_{ц}$ лампы. Зачастую при измерениях достаточно иметь лампу, аттестованную по цветовой температуре. Для определения светового потока в таком случае используют фотометры, например ТЕС0963, или люксметры-фотометры «Кварц-01», «Тензор-26», Ю116, или аттестованные по чувствительности фотометрические головки и др. С помощью этих устройств измеряется освещенность E в плоскости ФЧЭ и при известной величине его площади A , определяют световой поток

$$\Phi = EA. \quad (8)$$

В производственных условиях измерение параметров ФП упрощается, если использовать метод сравнения. Например, в качестве контрольного используют фотоприемник такого же типа и с такими же спектральными характеристиками, что и измеряемый. Интегральная чувствительность ФП в этом случае определяется соотношением (2).

Для измерения фототока или фотонапряжения используется стандартное оборудование: вольтметры, амперметры, осциллографы и др. Однако серийно изготовленные источники излучения отсутствуют. Такое оборудование создается производителем ФП, т. е. является нестандартизованным средством измерительных установок, что вносит дополнительную погрешность при измерениях интегральной чувствительности.

Распространенным элементом установок является фотометрическая скамья типа ФСМ-4У, которая оснащена разного назначения каретками, патронами для крепления ламп накалива-

ния, экранами и др. и обеспечивает измерения интегральной чувствительности ФП при освещенности от 0,1 до $5 \cdot 10^4$ лк. Необходимо отметить, что установка, собранная на базе скамьи ФСМ-4У, громоздкая, неудобная для работы при серийном производстве ФП, к тому же требует специального (затемненного) помещения.

Лучшим вариантом осветителя является осветитель типа К22.410 с лампой накаливания РН12-100. Это блок простой конструкции, в котором источник излучения и измерительный ФП изолированы от влияния фоновых засветок. Освещенность в плоскости ФЧЭ ФП составляет 1000 лк без ослабляющих светофильтров и 100, 10, 1 лк при ослаблении потока светофильтрами. Данный осветитель наиболее удобен при серийном производстве ФП.

При производстве ФП применяют и сложные по конструкции осветители, например осветитель АДБ136.00, который используется в установках для измерения интегральной чувствительности в широком диапазоне изменения освещенностей — от $1 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^4$ лк. Этот осветитель является универсальным устройством измерительной техники с высокими метрологическими характеристиками. Основные его недостатки — низкая продуктивность и искажение спектрального состава потока излучения.

При использовании установок, в состав которых входят описанные осветители, относительная погрешность измерения интегральной чувствительности находится в пределах от ± 5 до $\pm 10\%$.

Фотоприемники, чувствительные в УФ-диапазоне

Особый интерес у разработчиков ФП вызывают измерительные приборы, которые имеют спектральные характеристики чувствительности, скорректированные под определенную форму. Так, спектр ультрафиолетового диапазона делится на три области: УФ-С — от 200 до 280 нм; УФ-В — от 280 до 315 нм; УФ-А — от 315 до 400 нм [9, 10]. Для проведения фотометрических расчетов и определения пригодности ФП для той или иной области спектра необходимо иметь значения интегральной чувствительности, однако при ее определении возникают проблемы метрологического обеспечения фотоприемниками, чувствительность которых не зависит от спектрального распределения оптического излучения.

В нормативной документации [2] не приводятся типы источников, которые могут быть аттестованы и использованы для измерения интегральной чувствительности ФП в УФ-диапазоне. Из-за низкой интенсивности ламп накаливания в качестве источников УФ-излучения используют газоразрядные лампы, несмотря на то, что они характеризуются достаточно высокой нестабильностью, неравномерным пространственным распределением потока излучения и из-

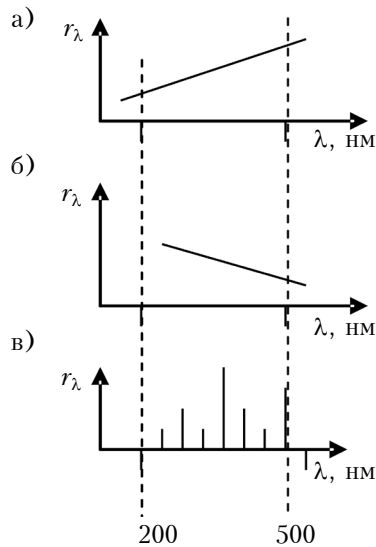


Рис. 4. Спектральное распределение потока излучения r_λ сварочной дуги и ксеноновой лампы (а), водородно-дейтериевых ламп (б) и ртутных ламп (в)

менением спектрального состава излучения во времени. (Это делает понятным отсутствие рекомендаций по использованию источников, которые излучают в УФ-диапазоне.) Используют газоразрядные лампы с водородным или дейтериевым наполнением: лампы со сплошным (непрерывным) спектром излучения типа ДВС-30, ДДС-30, ДДС-400 и ЛД(Д); ртутные лампы типа ДРТ-220, ДРТ-400, ДРШ-100 и ДРТ-250 с линейчатым спектром и ксеноновые лампы ДКсШ-120, ДКсШ-150.

На рис. 4 схематично приведено спектральное распределение потока излучения различных ламп. Как уже отмечалось, кроме пространственной и временной нестабильности, газоразрядные лампы и дуговые источники излучения имеют разный характер спектрального распределения потока излучения. В таком случае интегральная чувствительность ФП будет меняться и, конечно, о чувствительности можно говорить только в связи с излучением конкретного источника.

Методики определения интегральной чувствительности довольно сложны и предусматривают несколько этапов — сначала проводятся измерения монохроматической чувствительности ФП, а затем по известному относительному спектральному распределению излучения источника и измеренной спектральной характеристике ФП определяют интегральную чувствительность.

Измерение монохроматической чувствительности удобно проводить на установке с ртутным источником излучения, выделив с помощью монохроматора или интерференционных светофильтров линии ртути в различных поддиапазонах: УФ-С — длину волны $\lambda_{\max}=254$ нм; УФ-В — $\lambda_{\max}=313$ нм; УФ-А — $\lambda_{\max}=365$ нм [11].

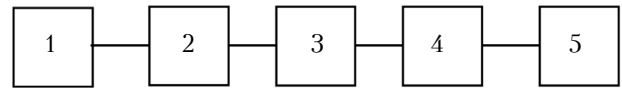


Рис. 5. Структурная схема установки для измерения интегральной чувствительности ФП УФ-диапазона: 1 — источник УФ-излучения (лампа ДРТ220); 2 — интерференционный фильтр на поддиапазон спектра (А, В, С); 3 — эталонный или исследуемый ФП; 4 — преобразователь «ток — напряжение» (ППТН-2); 5 — вольтметр (В7-23, В7-34)

Структурная схема установки для измерения интегральной чувствительности ФП, чувствительных в УФ-диапазоне, приведена на рис. 5.

Для уменьшения общей погрешности измерения чувствительности необходимо следующее:

- конструкция установки должна обеспечивать энергетическую освещенность в плоскости крепления радиометрической головки не менее $0,1 \text{ Вт/м}^2$;
- интерференционный фильтр должен иметь максимум пропускания в поддиапазоне А на длине волны $\lambda_{\max}^A=365$ нм; В — $\lambda_{\max}^B=313$ нм; С — $\lambda_{\max}^C=254$ нм;
- эталонный ФП должен быть аттестован по чувствительности в спектральном диапазоне от 200 до 500 нм с погрешностью не более $\pm 5\%$.

После подготовки установки к работе, настройки интерференционного фильтра, например, на поддиапазон С и установки на эталонный ФП диафрагмы диаметром $d=0,005-0,07$ м проводится измерение фотосигнала U_k (в В), после чего рассчитывается энергетическая освещенность E_{e1} , создаваемая потоком излучения на длине волны $\lambda_{\max}^C=254$ нм:

$$E_{e1} = \frac{4U_k}{K_{\text{пр}} S_{k1} \pi d^2} \text{ [Вт/м}^2\text{]}, \quad (9)$$

где S_{k1} — токовая монохроматическая чувствительность эталонного ФП на длине волны $\lambda_1=\lambda_{\max}^C$, А/Вт.

Вместо эталонного ФП устанавливается исследуемый ФП со спектральной характеристикой чувствительности в УФ-С диапазоне, измеряется фотосигнал U_d (в В) и определяется интегральная чувствительность к энергетической освещенности по формуле

$$S_{\text{инт}}^C = \frac{U_d}{E_{e1} S_\lambda^C K_{\text{ДРТ}}^C K_{\text{по}}}, \quad (10)$$

где $K_{\text{ДРТ}}^C$ — коэффициент, который определяет отличие формы относительной спектральной характеристики чувствительности реального ФП (S_λ^C) в поддиапазоне С от формы идеального ФП ($S_{\lambda_i}^C$) для ртутных источников УФ-излучения ($S_{\lambda_i}^C=1$ в рабочем диапазоне и $S_{\lambda_i}^C=0$ вне рабочего диапазона).

Коэффициент $K_{\text{ДРТ}}^C$ определяется по формуле

$$K_{\text{ДРТ}}^C = \frac{\int_{\lambda=200}^{500} S_{\lambda i}^C r_{\lambda}^{\text{ДРТ}} d\lambda}{\int_{\lambda=200}^{500} S_{\lambda}^C r_{\lambda}^{\text{ДРТ}} d\lambda}, \quad (11)$$

где $r_{\lambda}^{\text{ДРТ}}$ — спектральное распределение потока излучения ртутной лампы.

Аналогично определяется интегральная чувствительность ФП в диапазонах В и А.

Отметим, что методики измерения интегральной чувствительности ФП в УФ-диапазоне мало исследованы, метрологически не обеспечены и достаточно сложны. Упростить процесс ее измерения с помощью метода сравнения не удастся — из-за переменных, которые влияют на результаты измерения (неодинаковая величина относительного значения интегральной чувствительности ФП на рабочей длине волны для партии измерительных ФП и неодинаковая разность спектральной характеристики реального и идеального ФП) погрешность измерения увеличивается до 70–80%.

При определении интегральной чувствительности ФП УФ-диапазона в соответствии с описанной методикой относительная погрешность измерений находится в пределах от ± 15 до $\pm 40\%$.

Приведенный в статье анализ проблем, возникающих при измерениях интегральной чувствительности фотоприемников ИК-, видимого и УФ-диапазона, а также некоторые рекомендации для их решения будут полезны, на наш взгляд, разработчикам ФП и их потребителям, а при исследованиях в ИК- и видимом диапазонах облегчат поиск необходимых составляю-

щих установок для проведения измерений, таких как источник излучения, блок питания, измерительные устройства.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ГОСТ 21934-83 Приемники излучения. Полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения.
2. ГОСТ 7772-88 Приемники излучения. Полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик.
3. Докторович И. В., Бутенко В. К., Годованюк В. Н. и др. Влияние нестабильности потока излучения ртутных ламп на калибровку приборов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 1. — С. 54–57.
4. Докторович И. В., Фодчук І. М., Бутенко В. К. та ін. Спектральний розподіл потужності випромінювання ртутних ламп // Науковий вісник Чернівецького університету. — 2007. — Вип. 344: Фізика. Електроніка. — С. 80–83.
5. www.victorialight.narod.ru
6. Васильченко Н. В., Борисов В. А. и др. Измерение параметров приемников оптического излучения. — Москва: Радио и связь, 1983.
7. Бутенко В.К., Годованюк В.М., Докторович І.В. Прецизійний перетворювач струм — напруга // Науковий вісник Чернівецького університету. — 2001. — Вип. 102: Фізика. Електроніка. — С. 84–85.
8. Гуревич М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы). — Ленинград: Энергоатомиздат, 1983.
9. Гигиеническая оценка и методы контроля оптического излучения производственных источников (методические рекомендации). — Киев: Министерство здравоохранения УССР, 1986.
10. Санітарні норми та правила устрою, експлуатації та контролю обладнання, яке генерує електромагнітне випромінювання оптичного діапазону (інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове). — Київ: АМН України, 1997.
11. Докторович И.В., Бутенко В.К., Годованюк В.Н. и др. Методика калибровки УФ-радиометров энергетической освещенности // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — № 1. — 2008. — С. 57–61.

Дата поступления рукописи
в редакцию 04.02 2015 г.

І. В. ДОКТОВИЧ, В. М. ГОДОВАНЮК, В. Г. ЮР'ЄВ, В. Г. ЖИТАРЮК*

Україна, м. Чернівці, ЦКБ «Ритм»,

*Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

E-mail: rhytm@chv.ukrpack.net

ПРОБЛЕМИ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ЧУТЛИВОСТІ ФОТОПРИЙМАЧІВ ТА ДЕЯКІ ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ

Розглянуто проблеми, які виникають при вимірюванні інтегральної чутливості фотоприймачів (ФП) у різних спектральних діапазонах.

Проблемою вимірювань за стандартизованими методиками у видимій та ІЧ-області спектра є використання джерел з різним спектральним складом потоку (це, в першу чергу, лампи розжарювання і абсолютно чорні тіла). Для забезпечення однаковості виконання вимірювань виробниками та споживачами ФП в цьому діапазоні в роботі надано рекомендації з використання конкретних засобів вимірювальної техніки. Також проведено аналіз і дано оцінку перевагам та недолікам використовуваних засобів вимірювань, приведено метрологічні характеристики використовуваних методик, визначено причини зростання похибок вимірювань і можливі шляхи їх зменшення. Ці рекомендації дозволять спеціалістам визначати рівень виконуваних ними вимірювань та підібрати оптимальний варіант засобів вимірювань.

Що стосується вимірювань інтегральної чутливості ФП УФ-діапазону, тут проблеми значно складніші, оскільки виробництво УФ-приймачів метрологічно не забезпечено — відсутні як норматив-

на документація, так і контрольні фотоприймачі. Автори приводять результати досліджень методик вимірювань, розглядаючи різні типи джерел випромінювання, їх недоліки та переваги; розглядають методики і похибки вимірювань інтегральної чутливості ФП УФ-діапазону.

Ключові слова: фотоприймачі, інтегральна чутливість, фотоелектричні параметри, проведення вимірювань, ІЧ, УФ, видимий діапазон, похибка вимірювань.

DOI: 10.15222/TKEA2015.2-3.53
UDC 551.510.534621.383.52

I. V. DOKTOROVICH, V. N. HODOVANIUK,
V. G. YURYEV, V. G. ZHYTARYUK*

Ukraine, Chernivtsi, Rhythm Optoelectronics, Inc.,
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
E-mail: rhythm@chv.ukrpack.net

PROBLEMS IN MEASUREMENT OF INTEGRATED SENSITIVITY OF PHOTODETECTORS

The research work deals with the problems in measurement of integral sensitivity of photodetectors, which arise while using them in standard methods of visible and infrared radiation of the sources of radiation with different spectral composition of the flow. First of all, it is the usage of incidence lamps and of absolute black body.

To provide the unity of carrying out the measurements by producers and users of photodetectors, the specific methods with the appliance of specific means of measuring equipments are recommended in this research work. The analysis and the assessment of the advantages and disadvantages of the means of measurement which are used are done in this work. Also, metrological characteristics of the methods which are used, the reasons of increasing errors and possible ways of their decreasing are provided. The work's results give specialists the opportunity to determine the level of the measurements done by them or to choose the optimal variant of measuring means.

It is more difficult to solve the problems in measuring integral sensitivity of photodetectors which are sensitive in ultra-violet range. The production of ultra-violet detectors is not metrologically based — standard documents and control photodetectors are not provided. The authors of the article give the results of researching the methods of measuring, analyzing different types of radiation sources, their disadvantages and advantages; give the methods and errors of measuring of integral sensitivity of photodetectors of ultra-violet range.

Keywords: thermoelectric converters, thermoelectric source of electricity, electronic medical thermometer.

REFERENCES

1. GOST 21934-83 Priemniki izlucheniya. Poluprovodnikovye fotoelektricheskie i fotopriemnye ustroystva. Terminy i opredeleniya [State Standard 21934-83 Radiation detectors. Semiconductor photoelectrical and photoreceiving devices]. Teams and definitions. Moscow, 1985. (Rus)
2. GOST 17772-88. Priemniki izlucheniya Poluprovodnikovye fotoelektricheskie i fotopriemnye ustroystva. Metody izmereniya fotoelektricheskikh parametrov i opredeleniya kharakteristik. [State Standard 17772-88. Radiation detectors. Semiconductor photoelectrical and photoreceiving devices. Methods of measuring of photoelectrical parameters and defining characteristics]. Moscow, 1988. (Rus)
3. Doktorovich I.V., Butenko V.K., Hodovaniouk V.N., Riuhtin V.V., Fodchuk I.M., Yuryev V.G. [The influence of radiation instability flow of mercury lamps on the instrument calibration]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2006, no 1, pp. 54-57. (Rus)
4. Doktorovich I.V., Fodchuk I.M., Butenko V.K., Hodovaniouk V.N., Yuryev V.G., Zhytaryuk V.G. [Spectral distribution of mercury lamp radiation power]. *Scientific bulletin of Chernivtsi University*, 2007, iss. 344, pp. 80-83. (Rus)
5. www.victorialight.narod.ru
6. Vasil'chenko N. V., Borisov V.A. et al. [Measuring parameters of optical radiation receivers]. *Izmerenie parametrov priemnikov opticheskogo izlucheniya*, Moscow, Radio i svyaz', 1983, 88 p. (Rus)
7. Butenko V.K., Hodovaniouk V.M., Doktorovich I.V. [Precise converter current — tension]. *Scientific bulletin of Chernivtsi University*, 2001, iss. 102, pp. 84-85. (Rus)
8. Gurevich M.M. *Fotometriya (teoriya, metody i pribory)* [Photometry (theory, methods and instruments)]. Leningrad, Energoatomizdat, 1983, 272 p.
9. *Recommendations of the Ukrainian SSR Ministry of Health: Gigienicheskaya otsenka i metody kontrolya opticheskogo izlucheniya proizvodstvennykh istochnikov* [Hygienic assessment and methods of control of optical radiation of production sources]. Kiev, 1986. (Rus)
10. *Sanitarni normi ta pravila ustroyu, ekspluatatsiyi ta kontrolyu obladnannya, yake generuye elektromagnitne viprominyuvannya optichnogo diapazonu (infrachervone, vidime, ul'trafioletove)* [Sanitary standards and rules of construction, exploitation and control of equipment which generates electromagnetic radiation of optical ranges (infrared, visible, ultraviolet)]. AMS of Ukraine, Kyiv, 1997. (Ukr)
11. Doktorovich I.V., Butenko V.K., Hodovaniouk V.N., Fodchuk I.M., Yuryev V.G. [UV irradiance radiometers calibration procedure]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2008, no 1, pp. 57-61. (Rus)

К. ф.-м. н. А. Л. КУКЛА¹, А. В. МАМЫКИН¹, А. С. МАЙСТРЕНКО¹,
к. х. н. Е. В. ПОЛУНКИН², Л. И. СТАРЖИНСКАЯ²

Украина, г. Киев, ¹Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ,

²Институт биоорганической химии и нефтехимии НАНУ

E-mail: kukla@isp.kiev.ua, polunkin@i.kiev.ua

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ АНАЛИЗА БЕНЗАНЛЬНОГО ТОПЛИВА

Разработан метод экспресс-контроля состава трехкомпонентных топливных смесей типа «бензин—спирт—вода», основанный на спектроимпедансном исследовании бензанльного смеси в полосе частот 500 Гц — 10 кГц. Установлена корреляционная зависимость между величинами диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления топливной смеси и содержанием в ней этилового спирта и воды. На основе этих зависимостей сформирована градуировочная номограмма для количественной оценки бензиновой и водно-спиртовой компонент в исследуемом бензанльном топливе в актуальном диапазоне концентраций.

Ключевые слова: импедансная спектроскопия, бензоспиртовое топливо, водно-спиртовой раствор, диэлектрическая проницаемость, удельное сопротивление.

Для определения состава бензинового топлива обычно используют такие традиционные аналитические способы, как хроматографический анализ, ИК- и УФ-спектроскопия, атомно-эмиссионная спектроскопия. Однако эти методики требуют дорогостоящего и громоздкого оборудования, продолжительны во времени и поэтому непригодны для экспресс-анализа образцов топлива. Вместе с тем, для исследования эксплуатационных характеристик бензиновых смесей используются также диэлектротометрические измерения, применяющиеся для экспресс-определения октанового числа [1], классификации товарных марок бензина и газоконденсатных легких фракций [2], идентификации товарных и сырьевых нефтепродуктов [3]. Известны также способы определения качества нефтепродуктов по величине их удельного сопротивления [4]. Отметим, что бензин, получаемый при стандартной переработке нефти (прямая перегонка, каталитический крекинг, каталитический реформинг), является практически непроводящей жидкостью. Вследствие этого электрические методы измерения не получили широкого распространения, поскольку требуют применения высоковольтного оборудования и высококвалифицированного персонала. При наличии в составе бензина товарных марок электропроводящих присадок проводимость топливной смеси значительно увеличивается, и в составе общей проводимости бензина, кроме реактивной, появляется также активная составляющая. Последнее обстоятельство приводит к тому, что для определения электрофизических характеристик бензина (диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления) необходим анализ его импедан-

са. Описание подобного анализа подробно изложено в [5], где было рассмотрено применение спектроимпедансных исследований для определения содержания этанола в водно-спиртовых растворах. Достоинством метода является то, что он сравнительно прост и в то же время достаточно точен, хорошо поддается автоматизации. Подобный подход был использован и в данной работе для количественного компонентного анализа образцов бензоспиртового топлива.

Объекты и методы исследований

В работе использованы следующие методы: импедансная спектроскопия для определения диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления образцов бензоспиртового топлива, газовая хроматография для определения компонентного состава исходных бензинов, ареометрический метод определения содержания воды в водно-спиртовом растворе, а также исследовательский метод определения октанового числа автомобильного бензина. При импедансных измерениях проводится исследование полного сопротивления (импеданса) электрохимической ячейки конденсаторного типа, межэлектродное пространство которой заполнено анализируемым веществом, с последующим расчетом его электрофизических характеристик (диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления).

Измерения проводились с помощью измерителя иммитанса Е7-20 в частотном диапазоне от 500 Гц до 10 кГц с амплитудой сигнала 1 В. Для подобных измерений нами был модифицирован разработанный ранее [6] портативный импедансный анализатор (рис. 1), что позволило проводить измерения значительно более высо-



Рис. 1. Портативный импедансный измеритель со специальной электролитической ячейкой, разработанной для исследования жидких растворов с малым значением диэлектрической проницаемости и большим удельным сопротивлением

Относительное содержание компонент в очищенных пробах бензина разных торговых марок

Компонент	Торговая марка бензина и номер пробы			
	Shell (№1)	ОККО (№2)	WOG95 (№3)	WOG76 (№4)
Алканы				
изобутан	0,5	0,2	0,2	0,2
н-бутан	1,9	0,9	0,8	1,0
изопентан	18,1	14,1	11,5	6,5
н-пентан	4,2	3,6	4,2	3,9
2,2 диметилбутан	3,9	2,5	6,4	1,1
2-метилпентан	7,1	6,0	6,4	3,7
3-метилпентан	4,0	3,5	4,6	2,3
н-гексан	3,3	2,4	2,5	5,6
2-метилгексан	2,1	2,7	2,3	2,2
4-метилгексан	0,6	0,6	0,7	0,7
3-метилгексан	2,1	2,8	2,5	2,5
изооктан	—	—	1,5	1,0
н-гептан	1,5	1,7	1,7	3,9
триметилпентан	—	—	0,6	—
2-метилгептан	0,6	0,9	0,6	1,2
4-метилгептан	0,3	0,4	0,3	1,1
3-метилгептан	0,5	0,9	0,6	1,6
н-октан	0,5	0,6	0,5	2,7
метилоктан	0,2	0,3	0,2	0,3
н-нонан	0,06	0,07	0,06	1,0
н-декан	—	—	—	0,1
Всего	51,46	44,17	48,16	42,6
Циклические углеводороды				
циклопентан	1,4	1,2	1,4	2,0
метилциклопентан	3,5	2,9	2,4	3,5
циклогексан	2,3	0,8	2,2	5,6
диметилциклопентан	0,9	0,8	0,6	1,2
метилциклогексан	1,1	0,9	0,6	8,0
метилциклогексаны С8	1,9	2,9	1,9	2,9
метилциклогексаны С9	0,8	1,6	1,4	1,7
Всего	11,9	11,1	10,5	24,9
Ароматические углеводороды				
бензол	0,9	1,3	1,2	3,8
толуол	9,6	12,2	12,7	10,3
этилбензол	1,4	1,7	1,9	1,3
м-, п-ксилол	3,3	6,0	5,3	4,7
о-ксилол	1,0	2,0	1,8	1,3
алкилбензолы С9	2,1	2,4	2,4	2,7
алкилбензолы С10	0,2	0,2	0,6	0,5
Всего	18,5	25,8	25,9	24,6
Непредельные С5-С7	10,8	15,1	6,1	3,9
МТБЭ	7,1	3,4	9,2	—
Этанол	—	0,2	—	1,0
Октановое число (АИ)	94,1	87	95,1	80,8

коомных материалов (с удельным сопротивлением до $10^{12} - 10^{13}$ Ом·см), что характерно для органических жидкостей, получаемых при переработке нефти.

Для измерений использовалась цилиндрическая конденсаторная ячейка, электроды которой были изготовлены из устойчивой к агрессивным средам нержавеющей стали, а детали корпуса — из фторопласта. Объем пробной жидкости для однократного измерения составлял 25 мл. Все измерения проводились в специальном термобоксе при температуре 20°C, которая постоянно контролировалась.

Анализ компонентного состава исходных бензинов проводился при помощи газового хроматографа НР-6890 с плазменно-ионизационным детектором и капиллярной колонкой Рона (длина 50 м, внутренний диаметр 0,2 мм, толщина неподвижной фазы 0,5 мкм, рабочая температура 50–200°C, градиент 5°/мин). Определение содержания воды в образцах абсолютного спирта проводилось в соответствии с ГОСТ 3639-79 «Растворы водно-спиртовые» с точностью до 0,06%. Определение октанового числа образцов топлива проводилось в соответствии с ГОСТ 8226-82 «Топливо для двигателей. Исследовательский метод определения октанового числа».

В качестве объекта исследований использовалась трехкомпонентная топливная смесь «бензин — абсолютный спирт — дистиллированная вода» с разными соотношениями компонент. Содержание спирта в топливной смеси варьировалось в диапазоне от 3 до 11% об., при этом крепость самого спирта (точнее, водно-спиртового раствора) выбиралась в диапазоне от 99,9 до 94–96% об. (нижняя граница выбиралась с учетом сохранения фазовой стабильности получаемой топливной смеси при комнатной температуре). В качестве исходной спиртовой компоненты для формирования смесей использовали спирт-ректификат с концентрацией 96% об. Для обезвоживания исходного спирта применялась негашеная известь СаО, предварительно отожженная при температуре 200°C. Обезвоженный спирт отгонялся из спиртоизвестковой смеси в спиртоприемник, защищенный от атмосферной влаги хлоркальциевой трубкой.

В качестве бензиновой основы бензанолевого топлива использовались приобретенные в розничной сети образцы бензина разных товарных марок с различными октановыми числами. Для очистки исходных образцов бензина от возможных металлосодержащих присадок и механических примесей использовался аппарат для разгонки нефтепродуктов (отбирались бензиновые фракции с температурой кипения от 25 до 135°C). Относительное содержание компонент в очищенных таким образом образцах бензина, полученное с помощью хроматографического анализа, представлено в **таблице**.

Результаты и их обсуждение

Как указывалось выше, стандартный бензин по своим электрическим характеристикам относится к классу жидких диэлектриков. Смешивание бензина с электропроводящими примесями (в частности, с этанолом), которые повышают его октановое число, приводит к появлению активной составляющей импеданса. Нами установлено, что бензоспиртовые растворы в области средних частот 500 Гц — 10 кГц могут быть представлены эквивалентной электрической схемой в виде двухэлементной RC-цепи с параллельно соединенными межэлектродной емкостью C и сопротивлением раствора R , которая описывается следующими уравнениями:

$$\operatorname{Re} Z = \frac{R}{4\pi^2 C^2 R^2 v^2 + 1}; \quad (1)$$

$$\operatorname{Im} Z = \frac{2\pi C R^2 v}{4\pi^2 C^2 R^2 v^2 + 1}. \quad (2)$$

где v — частота;

$\operatorname{Re} Z$, $\operatorname{Im} Z$ — активная и реактивная составляющие импеданса.

Теоретически, поскольку выражения (1) и (2) образуют систему уравнений с двумя неизвестными, для определения величин R и C достаточно измерить импеданс на одной фиксированной частоте. Однако на практике нами использовался более надежный и точный способ определения этих параметров, основанный на измерении частотных зависимостей активной и реактивной составляющих импеданса исследуемых смесей в диапазоне 500 Гц — 10 кГц (**рис. 2**).

В дальнейшем для определения интересующих нас электрофизических параметров (диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления) проб бензанолевых смесей использовалась процедура аппроксимации экспериментальных частотных зависимостей выражениями (1) и (2) [5]. В качестве начального приближения по величине R для модельного расчета принималось измеренное значение активной составляющей импеданса на нижней частоте диапазона (500 Гц) в соответствии с приближенным равенством $\operatorname{Re} Z(v) \approx R$. Начальное приближение по величине емкости C определяли согласно приближенному равенству $\operatorname{Im} Z(v) \approx 1/(2\pi v C)$, используя измеренное значение реактивной составляющей на верхней частоте диапазона 10 кГц. Затем, принимая полученные значения за исходные, эти значения уточнялись по полным кривым $\operatorname{Re} Z(v)$ и $\operatorname{Im} Z(v)$ путем сравнения экспериментальной и теоретической кривых (**рис. 2, а–г**) и минимизации разностной функции методом наименьших квадратов. Результирующие значения искомых параметров R и C определялись усреднением по обеим кривым. Численный расчет проводился в Mathcad.

На **рис. 3** представлены пересчитанные в координаты диэлектрической проницаемости (ϵ) и удельного сопротивления (ρ) полученные зна-

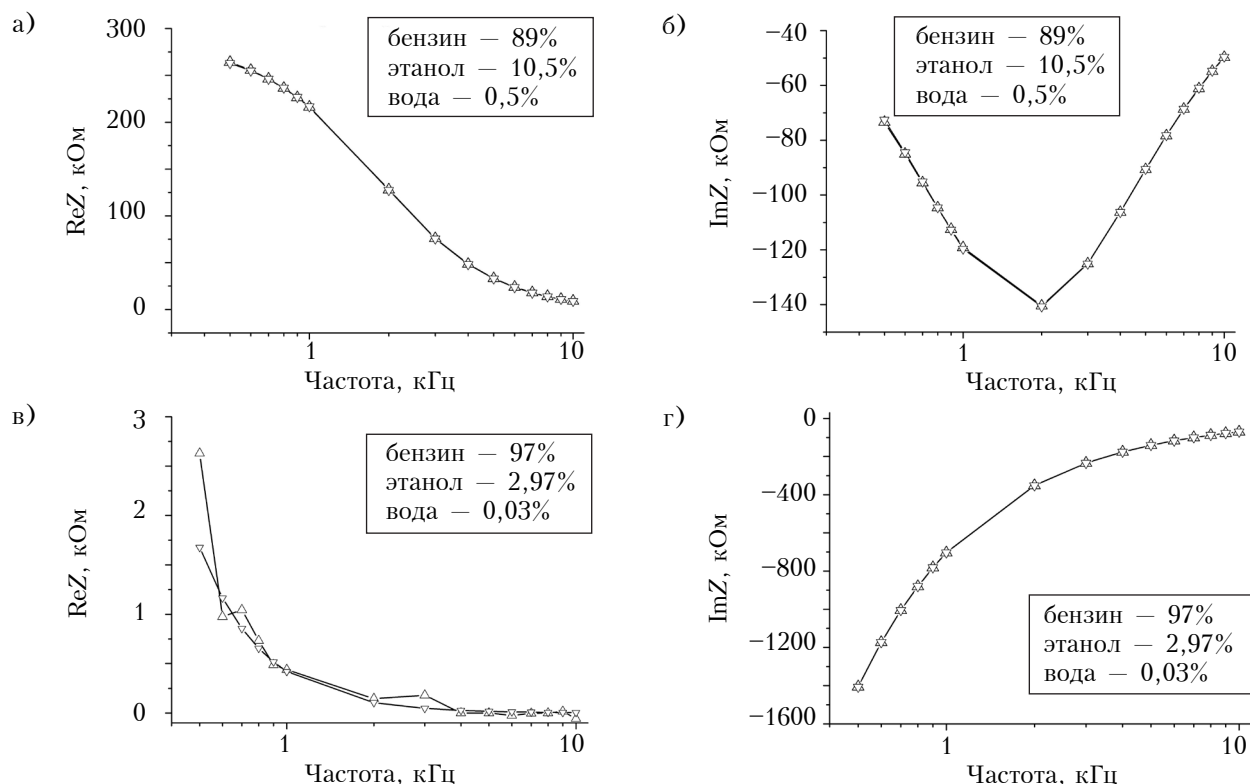


Рис. 2. Аппроксимация экспериментальных частотных зависимостей импеданса (Δ) модельными зависимостями (∇) для смесей разного состава

чения параметров R и C , соответствующие исследуемым образцам бензанолевого топлива, содержащим 95% исходного очищенного бензина и 5% водно-спиртового раствора. Крепость водно-спиртового раствора при этом варьировалась от абсолютной (100% спирта) до минимально возможной, соответствующей фазостабильному состоянию смеси (когда она не расслаивается на чистый бензин и водно-спиртовой рас-

твор, в данном случае это величина 96,5–97%). Ее значения указаны на графиках возле точек в процентах.

Как следует из рис. 3, несмотря на аналогичность содержания водно-спиртовых компонент во всех смесях, полученные для разных марок бензина кривые располагаются раздельно. Очевидно, это обусловлено различиями в исходном компонентном составе бензинов, поскольку в соответствии с [7] значения диэлектрической проницаемости компонент автомобильного топлива существенно различаются. Так, положение кривых может, в частности, зависеть от содержания в исходных образцах метилтретбутилового эфира (МТБЭ). Действительно, в соответствии с таблицей, максимальное содержание МТБЭ находится в образце №3 (9,2%), далее в порядке понижения идут образцы №1 (7,1%), №2 (3,4%) и №4 (отсутствует). Таким образом, использование кривых рис. 3 в качестве калибровочных зависимостей для точного определения состава бензанолевого топлива затруднено, поскольку одному и тому же содержанию спирта и воды в топливе соответствуют различные положения экспериментальных точек.

Для оценки погрешности определения состава, связанной с различиями в компонентном составе исходных бензинов, были дополнительно приготовлены образцы топлива с фиксированным содержанием водно-спиртового раствора (3, 7, 9 и 11%). Причем крепость водно-спиртового

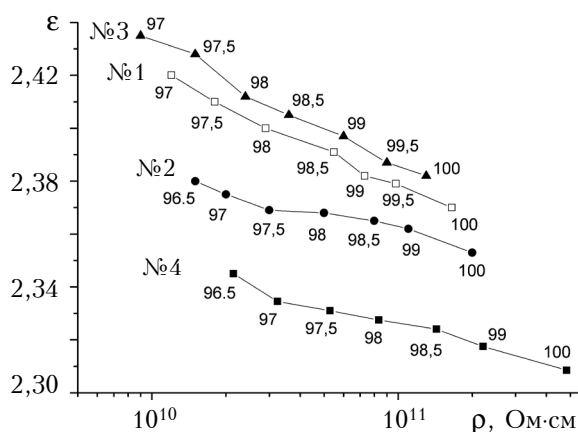


Рис. 3. Положение расчетных параметров, соответствующих четырем образцам бензиновых смесей с 5%-ным содержанием водно-спиртовой компоненты, в координатах диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления

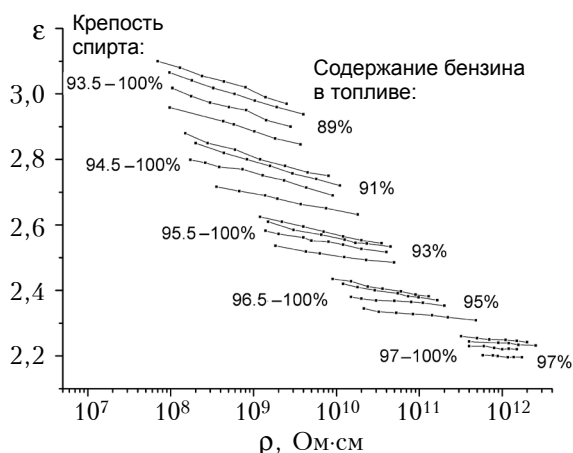


Рис. 4. Положение расчетных параметров, соответствующих всем исследуемым бензанольным смесям, в координатах диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления

раствора в каждом случае варьировалась от абсолютной до минимально возможной. Для каждой такой группы модельных бензанольных смесей были получены зависимости, аналогичные представленным на рис. 3, которые в итоге были выведены на общую диаграмму, представленную на рис. 4. Из диаграммы можно видеть, что несмотря на различия в составах исходных бензиновых марок, области, соответствующие фиксированным соотношениям бензиновой и водно-спиртовой компоненты в готовом топливе, достаточно хорошо отделены друг от друга. Учитывая также то, что эти области следуют с шагом изменения такого соотношения 2% об., можно утверждать, что количественную оценку доли водно-спиртовой компоненты в готовом бензанольном топливе можно сделать с точностью не хуже $\pm 1\%$ об.

Из представленных на рис. 4 данных следует, что с увеличением доли спирта в бензанольном топливе растет также и растворимость в нем воды. Так, для 97%-ного содержания бензина в смеси граничная крепость используемого водно-спиртового раствора, при которой еще не наблюдалось фазового расслоения смеси, составляла около 97% об., в случае же 89%-ного содержания бензина в готовом топливе минимальная крепость водно-спиртового раствора составляет уже 94% об. Таким образом, прослеживается довольно четкая граница зоны фазовой стабильности, соответствующая критическому содержанию воды в исследуемых образцах бензанольного топлива. Граница этой зоны фактически формируется значениями крайних левых точек всех кривых на рис. 4. Положение фазо-стабильной зоны для исследуемых смесей показано на рис. 5.

Усреднение приведенных на рис. 4 серий экспериментальных точек по четырем образцам исходного бензина позволило, учитывая границы зоны фазовой стабильности смесей, построить

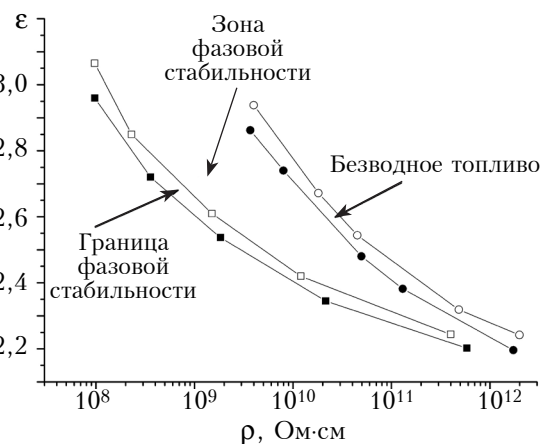


Рис. 5. Положение зоны фазовой стабильности бензанольного топлива (расположенные рядом пары кривых показывают область разброса, характерную для четырех исследуемых бензиновых марок)

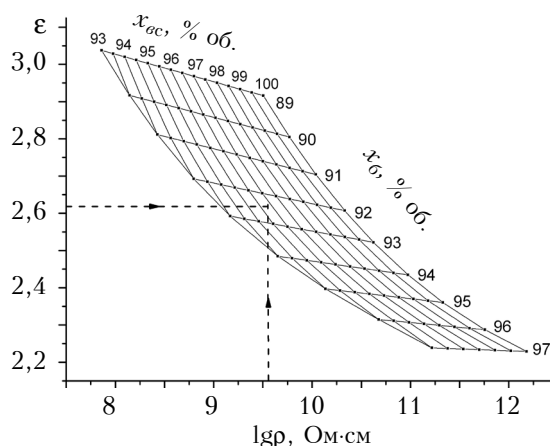


Рис. 6. Градуировочная сетка для определения содержания бензиновой (x_b) и водно-спиртовой (x_v) компонент в исследуемой бензанольной топливной смеси, полученная при температуре 20°C

градуировочную номограмму, приведенную на рис. 6, для графического определения содержания бензиновой и водно-спиртовой компонент в исследуемой бензанольной смеси по диэлектрической проницаемости и удельному сопротивлению (см. пунктирные линии на рисунке). При этом определение водно-спиртовой/бензиновой объемной части в исследуемом топливе достигается с погрешностью не более 1% об., а сама крепость водно-спиртового раствора (относительное содержание спирта и воды) определяется, по нашим оценкам, с погрешностью не более 0,8% об.

Выводы

В работе продемонстрированы теоретический и практический подходы к осуществлению экспресс-контроля состава трехкомпонентных топливных смесей типа «бензин — спирт — вода» методом импедансной спектроскопии. Выявленная корреляция величин диэлектрической проницае-

мости и удельного сопротивления с содержанием спирта и воды в топливной смеси свидетельствует о принципиальной возможности применения данного метода для определения состава бензанолевого топлива и предупреждения его возможного фазового расслоения на чистый бензин и водно-спиртовой раствор.

Показано, что компонентный состав исходных бензинов разных марок не оказывает существенного влияния на электрофизические характеристики исследованных образцов бензанолевого топлива, что обуславливает достаточную для практического применения точность оценки содержания спирта и воды в топливе. Для оценки их содержания в актуальном диапазоне концентраций 3–11%, характерных для бензанолевых топливных смесей, сформирована числовая градуировочная номограмма. С ее помощью возможно определение содержания водно-спиртовой компоненты с погрешностью не более 1% об., а крепости самого водно-спиртового раствора — не более 0,8% об.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пат. 2196321 С2 России. Способ определения октанового числа автомобильных бензинов / В. М. Пашенко, В. И. Ванцов, В. С. Чулков, Д. В. Сеницын. — 10.01. 2003.
2. Руднев В. А., Бойченко О. П., Карножицкий П. В. Класифікація товарних бензинів та легких газоконденсат-

них фракцій родовищ східних областей України на основі діелектрометричних та газохроматографічних даних // Методы и объекты химического анализа. — 2010. — Т. 5, №3. — С. 148–157.

3. Руднев В. А., Карножицкий П. В. Применение метода диэлектротметрии при экспертном исследовании нефтепродуктов // Вісник Харківського національного університету. — 2009. — №870, Хімія. — Вип. 17(40). — С. 172–177.

4. ГОСТ 25950-83. Топливо для реактивных двигателей с антистатической присадкой. Метод определения удельной электрической проводимости.

5. Кукла А. Л., Мамыкин А. В., Павлюченко А. С., Майстренко 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.

6. 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.

7. 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.

Дата поступления рукописи
в редакцию 23.02 2015 г.

О. Л. КУКЛА, А. В. МАМИКИН, А. С. МАЙСТРЕНКО,
Є. В. ПОЛУНКИН, Л. І. СТАРЖИНСЬКА

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ,
Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії НАНУ

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ІМПЕДАНСНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ ДЛЯ АНАЛІЗУ БЕНЗАНЛЬНОГО ПАЛИВА

Розроблено метод експрес-контролю складу трикомпонентних паливних сумішей типу «бензин — спирт — вода», заснований на спектроімпедансному дослідженні бензанолевої суміші в смузі частот 500 Гц — 10 кГц. Встановлено кореляційну залежність між величинами діелектричної проникності і питомого опору паливної суміші та вмістом в ній етилового спирту та води. На базі цих залежностей сформована градувальна номограма для кількісної оцінки бензинової і водно-спиртової компонент в досліджуваному бензанолевому паливі в актуальному діапазоні концентрацій.

Ключові слова: імпедансна спектроскопія, бензоспиртове паливо, водно-спиртовий розчин, діелектрична проникність, питомий опір.

DOI: 10.15222/TKEA2015.2-3.61
UDC 532.538; 539.21; 621.38

A. L. KUKLA¹, A. V. MAMYKIN¹, A. S. MAISTRENKO¹,
E. V. POLUNKIN², L. I. STARZHINSKA²

Ukraine, Kiev, V. E. ¹Lashkaryov Institute of semiconductor physics of NAS of Ukraine,
²Institute of bioorganic and petroleum chemistry of NAS of Ukraine

APPLICATION OF IMPEDANCE SPECTROSCOPY METHOD FOR ANALYSIS OF BENZANOL FUELS

The authors have developed a method for express control of three component «gasoline-alcohol-water» fuel mixtures based on the spectral impedance investigation of benzanol mixture in the frequency range of 500 Hz — 10 kHz.

A correlation dependence between the dielectric constant and the specific resistance of the fuel mixture on content of ethanol and water in the mixture has been found. On the basis of this dependence a calibration nomogram to quantify the gasoline and water-alcohol components content in the test benzanol fuel in the actual range of concentrations has been formed. The nomogram allows determining the water-alcohol and gasoline parts in the analyzed fuel with an error of no more than 1% vol., while the strength of water-alcohol solution is determined with an error of no more than 0.8% vol. The obtained nomogram can also give information about critical water content in the benzanol fuel to prevent its eventual phase separation. It is shown that the initial component composition of different gasoline brands has no significant effect on the electrical characteristics of the studied benzanol fuels, which makes the evaluation of alcohol and water content in the fuel sufficiently accurate. for practical applications.

Keywords: impedance spectroscopy, ethyl-gasoline fuel, water-alcohol solution, dielectric constant, resistivity.

REFERENCES

1. Pashchenko V. M., Vantsov V. I., Chuklov V. S., Sinitsyn D. V. Patent RF no. 2196321 C2. [State Standard 25950-83, 2013 The method for determining the octane number of motor gasoline]. 2003.
2. Rudnev V. A., Boichenko O. P., Karnozhits`kii P. V. [Classification of commercial gasoline and light gas condensate fractions from deposits in eastern regions of Ukraine on the basis of dielectrometric and chromatographic data]. *Metody i obekty khimicheskogo analiza*, 2010, vol. 5, no. 3, pp. 148-157. (Ukr)
3. Rudnev V. A., Karnozhitskii P. V. [Application of dielectrometry in expert study of mineral oil]. *Visnik Kharkivs'kogo natsional'nogo universitetu*, 2009, no. 870, Chemistry, iss. 17(40), pp. 172-177. (Rus)
4. GOST 25950-83. *Topливо dlya reaktivnykh dvigatelei s antistaticheskoi prisadkoi. Metod opredeleniya udel'noi elektricheskoi provodimosti*. [Jet fuel with antistatic additive.

Method for determining the electrical conductivity]. Moscow, Izdatel'stvo Standartov, 1984, 10 p. (Rus)

5. Kukla A. L., Mamykin A. V., Pavlyuchenko A. S., Maistrenko A. S. [Express analyzer of parameters of functional materials based on the method of impedance spectroscopy]. *Sensorna elektronika i mikrosistemni tekhnologiyi*, 2012, vol. 3(9), no. 3, pp. 6-15. (Rus)

6. Kukla A. L., Pavlyuchenko A. S., Maistrenko A. S., Mamykin A. V. [Impedance analyzer for identification of trademarks of aqueous-alcoholic drinks]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2012, no. 1, pp. 15-21. (Rus)

7. Skvortsov B. V., Silov E. A. [Research of correlation dependences between octan number and electrodynamic parameters of hydrocarbonic products]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2009, vol. 11, no. 5, pp. 64-71. (Rus)

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

- Вихор Людмила Николаевна*, докт. физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, г. Черновцы
- Демьянчук Борис Александрович*, докт. техн. наук, зав. кафедрой, Военная академия, г. Одесса
- Ёдгорова Дилбар Мустафаевна*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз, г. Ташкент
- Кадацкий Анатолий Федорович*, докт. техн. наук, зав. кафедрой, Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова
- Максименко Юрий Николаевич*, канд. техн. наук, зам. директора, ЧАО «Укрналит», г. Киев
- Маслов Олег Викторович*, докт. техн. наук, зав. кафедрой, Одесский национальный политехнический университет
- Николаенко Юрий Егорович*, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НТУУ «Киевский политехнический институт»
- Прудюс Иван Никифорович*, докт. техн. наук, директр института, НУ «Львовская политехника»
- Сафронов Павел Сергеевич*, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Сыворотка Игорь Михайлович*, начальник отдела, НПП «Карат», г. Львов
- Трофимов Владимир Евгеньевич*, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Фещенко Валерий Сергеевич*, канд. физ.-мат. наук, начальник научно-производственной лаборатории, ПТЦ «УралАлмазИнвест», г. Москва

1. К рассмотрению принимаются статьи прикладной направленности на русском или английском языке, которые не были опубликованы ранее и не переданы для публикации в другие издания.

2. В журнале публикуются результаты научно-практических и экспериментальных работ по тематическим направлениям, перечисленным на сайте журнала.

3. Все поступающие к рассмотрению материалы проходят двухсторонне-закрытое рецензирование.

4. При обнаружении плагиата или фальсификации результатов статья отклоняется.

5. Редакция не взимает плату за опубликование рукописи и не выплачивает авторский гонорар. Экземпляр журнала с опубликованной статьей высылается авторам по почте.

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 30 до 60 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 А от В. Из рисунка видно, что при возрастании В значение А монотонно уменьшается.», следует дать пояснение типа «Как видно из рис. 1, при возрастании В значение А монотонно уменьшается, что свидетельствует о том, что ...»;

— выводы (заключение) не должны повторять аннотацию — в них нужно показать, что получено в работе, кратко и четко сформулировать результаты работы, а не приводить 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» формируется в порядке их упоминания в тексте. Образец оформления списка см. на сайте.

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 допускается использование программ типа MathType только в тех случаях, когда Word бессилен, например при наборе специальных знаков над буквенными обозначениями, подкоренных выражений, пределов интегрирования, суммирования и т. п.

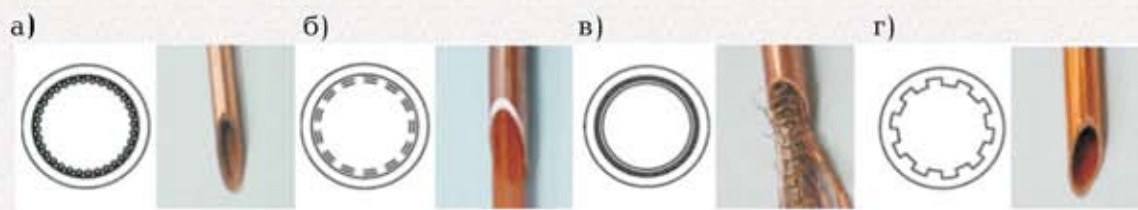
13. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а терминология соответствовать общепринятой. Все использованные символы и аббревиатуры нужно пояснить при первом их упоминании в тексте.

14. В начале статьи необходимо указать ее индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК).

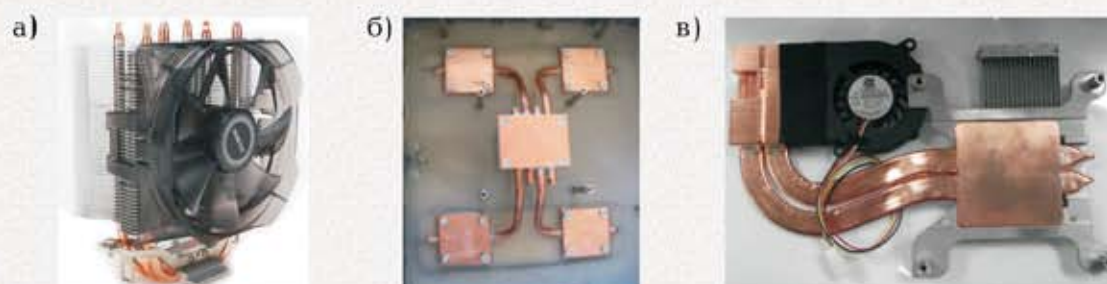
15. Материалы статьи, вместе с подписанным Авторским соглашением и информацией об авторах (см. на сайте), направляются по e-mail <tkea@optima.com.ua>.

P.S. Для контроля выполнения требований к содержанию статьи авторы могут воспользоваться критериями, по которым рукопись будет оцениваться рецензентом (см. бланк рецензии на сайте).

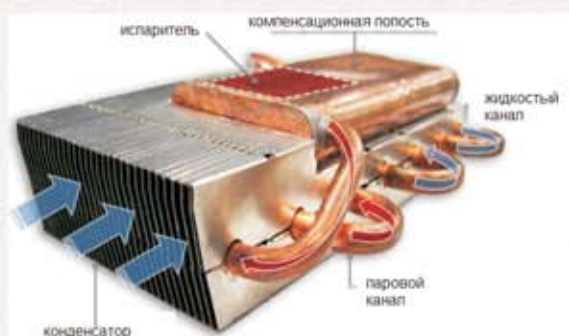
К статье «Применение тепловых труб в системах обеспечения тепловых режимов РЭА: современное состояние и перспективы»



Сечения ТТ с различными капиллярными структурами:
а — порошковая; *б* — сеточная; *в* — металловолоконная; *г* — канавчатая (конструкционная)



Системы охлаждения на основе медных микро- и миниатюрных ТТ:
а — активная система охлаждения процессора CNPS8X OPTIMA компании ZALMAN [10] с тремя ТТ для компьютера класса десктоп; *б* — пассивная система охлаждения процессора видеорегистратора с четырьмя ТТ [12]; *в* — активная система охлаждения процессора компьютера класса лэптоп с двумя ТТ (использованы сплюснутые ТТ)



Общий вид СОТР на основе КТТ



Общий вид радиатора на основе ПТТ

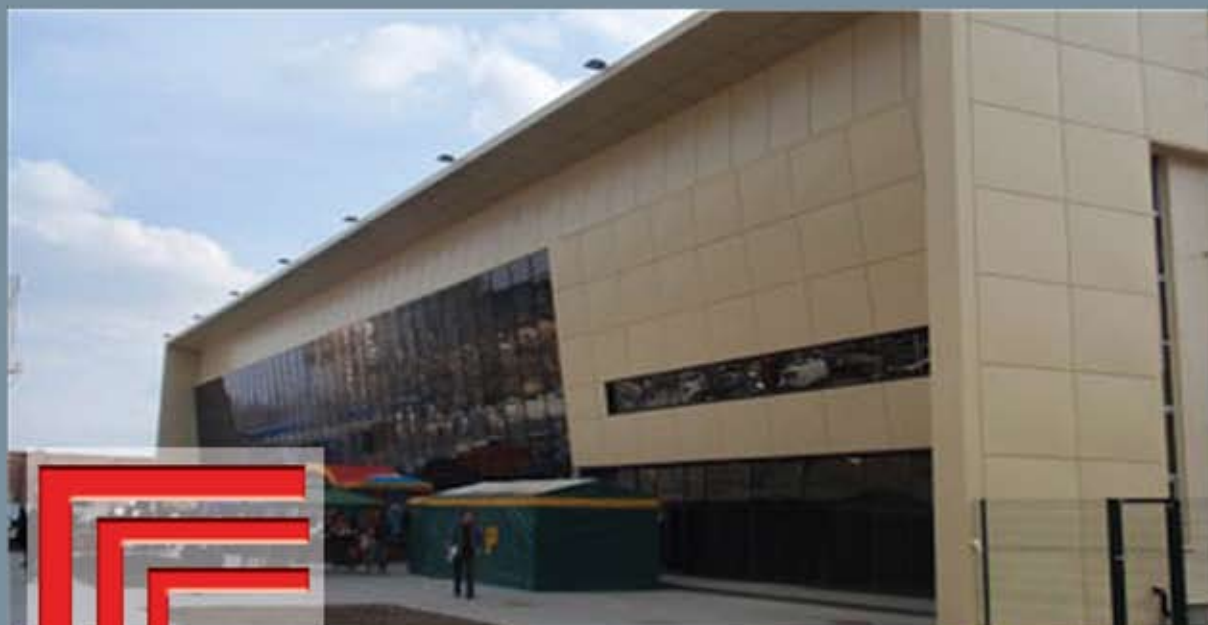


КТТ



КТТ

КТТ в системах охлаждения серверов (справа) и суперкомпьютеров (слева) [43]



ЭНЕРГИЯ 2015

11-я специализированная выставка
энергоэффективных решений
08—10 сентября 2015

Тематические разделы:

- Электроэнергетика
- Тепловая энергетика
- Электротехническое оборудование
- Контрольно-измерительные приборы и автоматика
- Промышленная автоматизация
- Кабельно-проводниковая продукция
- Электронные компоненты и системы
- Промышленное освещение
- Системы жизнеобеспечения промышленных объектов и жилья
- Энергосберегающие технологии
- Инновационные и инвестиционные проекты в энергетике

КОЗАК
ПАЛАЦ

Выставочный центр: Козак Палац
Украина, г. Запорожье, ул. Победы, 70
Телефон: +38 (061) 213 50 26
<http://expo.ua.all.biz/energiya-expo36>
Организатор: Запорожская ТПП

Намер готовили
Винница, Днепропетровск, Киев, Львов,
Москва, Одесса, Санкт-Петербург,
Ташкент, Черновцы



Пишите
Подписывайтесь
Читайте