

# ТРА

## ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

К статье  
«Новые конструктивно-технологические решения  
светодиодных модулей  
для ламп-ретрофитов»



# 6 2016

НОЯБРЬ — ДЕКАБРЬ

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

ISSN 2225-5818

Регистрационный номер КВ 21788-11688ПР

Выходит один раз в 2 месяца

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

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

---

---

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

## ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

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

---

---

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

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

**ТЕХНОЛОГИЯ  
И  
КОНСТРУИРОВАНИЕ  
В  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2016

№ 6

Год издания 40-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 (г. Киев),*

*зам. главного редактора*

*Д.ф.-м.н. В. В. Должиков (г. Харьков)*

*Д.т.н. А. А. Дружинин (г. Львов),*

*К.т.н. И. Н. Еримичой (г. Одесса)*

*Д.т.н. А. А. Ефименко (г. Одесса),*

*зам. главного редактора*

*Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк (г. Киев)*

*Д.т.н. С. И. Круковский (г. Львов)*

*Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)*

*Чл.-корр. НАНУ,*

*д.ф.-м.н. В. С. Лысенко (г. Киев)*

*К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)*

*Д.т.н. И. Ш. Невлюдов (г. Харьков)*

*Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)*

*Д.ф.-м.н. С. В. Плаксин (г. Днепр)*

*К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)*

*К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)*

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

*К.т.н. П. С. Сафронов (г. Одесса),*

*отв. секретарь редколлегии*

*Д.т.н. В. С. Ситников (г. Одесса)*

*Д. т. н. Я. Стеванович (г. Белград)*

*Д. т. н. З. Стевич (г. Белград)*

*Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)*

*К.т.н. В. Е. Трофимов (г. Одесса)*

УЧРЕДИТЕЛИ

Институт физики полупроводников

им. В. Е. Лашкарёва

Научно-производственное

предприятие «Сатурн»

Одесский национальный

политехнический университет

Издательство «Политехпериодика»

Одобрено к печати

Ученым советом ОНПУ

(Протокол № 4 от 27.12 2016 г.)

Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

**СОДЕРЖАНИЕ**

**Современные электронные технологии**

Новые конструктивно-технологические решения светодиодных модулей для ламп-ретрофитов. *В. Н. Борщев, А. М. Листратенко, И. Т. Тымчук, М. А. Проценко, Г. И. Никитский, А. А. Фомин, Л. А. Назаренко, В. М. Сорокин, А. В. Рыбалочка, А. С. Олейник*

3

**Электронные средства: исследования, разработки**

Проектирование электронной аппаратуры на основе стандартных несущих конструкций с использованием ресурсов Internet. *А. П. Карлангач* (на украинском языке)

11

**Энергетическая электроника**

Анализ энергетических и магнитных процессов в дросселях импульсных преобразователей электрической энергии. *А. Ф. Кадацкий, А. П. Русу*

17

**Обеспечение тепловых режимов**

CFD-моделирование радиатора для воздушного охлаждения микропроцессоров в ограниченном пространстве. *В. Е. Трофимов, А. Л. Павлов, Е. А. Мокроусова*

30

**Материалы электроники**

Влияние морфологии поверхности подложек ZnSe:Te на их оптические свойства. *В. П. Махний, И. И. Герман, Г. И. Бодюл, И. М. Сенко*

36

**Метрология. Стандартизация**

Измерение амплитудной диаграммы направленности и частотной характеристики антенн ISM-диапазона с помощью WiFi-маршрутизаторов. *А. В. Садченко, О. А. Кушниренко, И. В. Цевух, И. А. Валянский, Ю. С. Чихрай*

40

**Список рецензентов номера**

45

**Рекомендации авторам**

46

**Новые книги**

35

**ЗМІСТ**

**CONTENTS**

**Сучасні електронні технології**

Нові конструктивно-технологічні рішення світлодіодних модулів для ламп-ретрофітів. *В. М. Борщов, О. М. Лістратенко, І. Т. Тимчук, М. А. Проценко, Г. І. Нікітський, О. О. Фомін, Л. А. Назаренко, В. М. Сорокін, А. В. Рибалочка, О. С. Олійник* (3)

**Електронні засоби: дослідження, розробки**

Проектування електронної апаратури на основі стандартних несучих конструкцій з використанням ресурсів Internet. *О. П. Карлангач* (11)

**Енергетична електроніка**

Аналіз енергетичних та магнітних процесів у дроселях імпульсних перетворювачів електричної енергії. *А. Ф. Кадацький, О. П. Русу* (17)

**Забезпечення теплових режимів**

CFD-моделювання радіатора для повітряного охолодження мікропроцесорів в обмеженому просторі. *В. Є. Трофімов, О. Л. Павлов, О. О. Мокроусова* (30)

**Матеріали електроніки**

Вплив морфології поверхні підкладок ZnSe:Te на їх оптичні властивості. *В. П. Махній, І. І. Герман, Г. І. Бодюл, І. М. Сенко* (36)

**Метрологія. Стандртизація**

Вимірювання амплітудної діаграми спрямованості і частотної характеристики антен ISM-діапазону за допомогою WiFi-маршрутизаторів. *А. В. Садченко, О. А. Кушніренко, І. В. Цевух, І. А. Валянський, Ю. С. Чіхрай* (40)

**Modern electronic technologies**

The new design and technological solutions for the led modules for retrofit lamps. *V. M. Borshchov, O. M. Listratenko, I. T. Tymchuk, M. A. Protsenko, G. I. Nikitskiy, O. O. Fomin, L. A. Nazarenko, V. M. Sorokin, A. V. Rybalochka, O. S. Oleinik* (3)

**Electronic devices: research, development**

Designing electronic equipment on the basis of standard mechanical structures using Internet resources. *A. P. Karlangach* (11)

**Power electronics**

The analysis of energy and magnetic processes in inductors switched-mode electrical energy converters. *A. F. Kadatsky, A. P. Rusu* (17)

**Thermal management**

CFD-simulation of radiator for air cooling of microprocessors in a limited space. *V. E. Trofimov, A. L. Pavlov, E. A. Mokrousova* (30)

**Materials of electronics**

Influence of ZnSe:Te substrate's surface morphology on their optical properties. *V. P. Makhniy, I. I. Herman, G. I. Bodul, I. M. Senko* (36)

**Metrology. Standardization**

Measurement of the amplitude pattern and the frequency characteristic of ISM-band antennas using WiFi routers. *A. V. Sadchenko, O. A. Kushnirenko, I. V. Tsevukh, I. A. Valyanskii, Yu. S. Chikhrai* (40)

Д. т. н. В. Н. БОРЩЁВ<sup>1</sup>, к. т. н. А. М. ЛИСТРАТЕНКО<sup>1</sup>, И. Т. ТЫМЧУК<sup>1</sup>,  
М. А. ПРОЦЕНКО<sup>1</sup>, Г. И. НИКИТСКИЙ<sup>1</sup>, А. А. ФОМИН<sup>1</sup>, д. т. н. Л. А. НАЗАРЕНКО<sup>2</sup>,  
чл.-кор. НАНУ, д. т. н. В. М. СОРОКИН<sup>3</sup>, к. т. н. А. В. РЫБАЛОЧКА<sup>3</sup>, А. С. ОЛЕЙНИК<sup>3</sup>

Украина, г. Харьков, <sup>1</sup>ООО «Светодиодные технологии Украина»,

<sup>2</sup>Харьковская национальная академия городского хозяйства;

г. Киев, <sup>3</sup>Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ

E-mail: a\_oliynyk@isp.kiev.ua

## НОВЫЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ ЛАМП-РЕТРОФИТОВ

*Предложены принципиально новые конструктивно-технологические решения компактных объемных зеркализированных светодиодных модулей повышенной мощности. На их основе при использовании высокоэффективных светодиодов третьего поколения изготовлены экспериментальные образцы ламп-ретрофитов мощностью 10 и 15 Вт со светоотдачей от 105 до 160 лм/Вт.*

*Ключевые слова:* объемный светодиодный модуль, светодиодная лампа, конструктивно-технологические решения.

Интенсивное развитие светодиодной техники требует постоянного совершенствования как самих светоизлучающих структур, так и элементов конструкции систем, обеспечивающих нормальный тепловой режим светодиодов, оптических систем и электронного управления [1–4]. К энергосберегающим источникам света бытового применения в настоящее время традиционно относят компактные люминесцентные лампы. Светодиодные лампы стали использоваться в общем освещении относительно недавно. Однако по оптимистическим прогнозам в 2016 году светодиодные осветительные системы должны занять около 30% рынка источников света, а люминесцентные — около 40%. Ожидается, что в ближайшие три года стоимость одного люмена светодиодной лампы станет такой же, как и компактной люминесцентной, что приведет к резкому спросу на них. По прогнозам компании Philips к 2025 г. доля светодиодных ламп в структуре мирового осветительного рынка может достигнуть 70% [5]. На подобные перспективы могут рассчитывать и отечественные производители светодиодных ламп и светильников. Это связано с постоянным снижением мировых цен на светодиоды и устойчивым ежегодным повышением их светоотдачи, которая сегодня приближается к 200 лм/Вт для промышленных приборов. Достичь таких показателей другим видам источников света уже не под силу.

В настоящее время для бытового и общепромышленного освещения разработаны лампы-ретрофиты, в которых в качестве излучателей малой и средней мощности применяются многокристальные (chip-on-board, **COB**) модули и светодиодные модули на основе поверхностного монтажа (surface-mount device, **SMD**). Модули, как правило, выполняются в виде плоских круг-

лых, кольцевых или многоугольных печатных плат с металлизированным или выполненным на основе теплопроводной керамики основанием, на которое устанавливаются светодиоды с односторонними оптическими осями.

Плоские светодиодные модули (**СДМ**) устанавливаются в защитной светорассеивающей колбе диаметром 50–60 мм с вынесенным из нее радиатором, примыкающим к плате. В лампах с цоколем E27 электронные системы управления (драйверы) встроены в цокольную часть в отсеке радиатора, который является общим для светодиодного модуля и электронных элементов драйвера. Такой широко распространенный конструктивный подход приводит к значительным потерям оптического излучения на светорассеивающих элементах, а также к потерям мощности на драйвере [6], что больше всего проявляется при создании компактных ламп с мощностью более 10 Вт. В результате этого характеристики ламп значительно снижаются по сравнению с используемыми в них светодиодными модулями, имеющими светоотдачу 120–160 лм/Вт и срок службы 60–100 тыс. часов.

На практике существенные технические проблемы появляются при организации серийного производства высокоэффективных компактных светодиодных ламп-ретрофитов с излучателями на плоских модулях со светоотдачей более 100 лм/Вт, с цветовой температурой 2700–3000 К, индексом цветопередачи 80–90, мощностью 10 Вт и более. В таких лампах необходимо конструировать светорассеивающие колбы, удовлетворяющие требованиям по блескости, а сами лампы должны иметь срок службы 40–60 тыс. часов, обладать удовлетворительным, более 0,8, коэффициентом мощности, а также обеспечивать требуемый стандартами коэффициент пульса-

ций светового потока — от 5 до 20%, в зависимости от сферы применения. Потеря эффективности лампы при использовании светодиодов с достаточно высокой светоотдачей связана, прежде всего, с проблемами охлаждения светодиодов и оптических потерь в лампе из-за близкого расположения светодиодов друг к другу на плате модуля и расположения модуля в колбах малых габаритов. Уменьшение эффективности светодиодных ламп связано также с потерями светового потока на стенках рассеивающих колб. Перечисленные выше проблемы относятся также и к плоским светодиодным модулям в лампах малой мощности от 4 до 8 Вт.

Очевидно, что весьма актуальной задачей является разработка и исследование новых, более совершенных конструктивно-технологических решений светодиодных модулей для ламп-ретрофитов, обеспечивающих более эффективный отвод теплоты от светодиодных источников света и более эффективное светораспределение. Решить эту задачу позволяет применение объемных светодиодных модулей, выполняющих функции держателей светодиодов и одновременно радиаторов кондуктивного теплоотвода. Использование для охлаждения СДМ радиационной теплопередачи в окружающую среду за счет увеличения площади и коэффициента излучения поверхности держателей светодиодов значительно улучшает температурные условия работы светодиодов. Применение объемных СДМ со светоотражающими зеркализированными стенками держателей светодиодов обеспечивает разнонаправленную ориентацию в пространстве оптических осей светодиодов для улучшения светораспределения и снижения блескости излучателя. Повышение качества светораспределения и нормальный тепловой режим обеспечиваются также за счет расположения оптических осей светодиодов перпендикулярно стенкам колбы, а также за счет увеличения количества светодиодов (за счет применения менее мощных светодиодов) [6–9]. Такой подход позволяет сохранить или уменьшить размеры излучателя или колбы лампы, увеличить суммарную площадь монтажа светодиодов и компактно рассредоточить их на радиаторе, увеличив тем самым площадь кондуктивного теплоотвода на вынесенную из колбы часть указанного радиатора. Кроме того, такие конструктивные решения позволяют обеспечить улучшенную радиационную теплопередачу от держателей светодиодов и возможность увеличения световой эффективности объемных СДМ в составе лампы за счет дополнительного переотражения излучения в колбе рассеивателя и вывода его в окружающее лампу пространство.

Целью настоящей работы является разработка инновационных конструктивно-технологических решений плоских и объемных светодиодных модулей широкого диапазона мощности (4–15 Вт) для

высокоэффективных компактных бытовых ламп-ретрофитов со светоотдачей более 100 лм/Вт, цветовой температурой 2800–5500 К и индексом цветопередачи более 80.

#### Многокристалльные плоские светодиодные модули

В 2013–2014 гг. компанией ООО «Светодиодные технологии Украина» (г. Харьков) совместно с Институтом физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины (г. Киев) были проведены работы по разработке и освоению производства светодиодных ламп с использованием многокристалльных плоских светодиодных модулей для замены ламп накаливания и компактных люминесцентных ламп. Результатом стало создание принципиально новых многокристалльных светодиодных модулей с применением высокоэффективных импортных светоизлучающих кристаллов синего света типа EDI-EA1734 (0,3 Вт) компании EDISON Optocorporation (Тайвань).

На основании результатов анализа свойств различных теплопроводящих плат была выбрана составная конструкция теплопроводящего основания СОВ-модулей для светодиодных ламп. Эта конструкция представляет собой сборочный узел, в котором на зеркализированном круглом основании из материала MIRO-SILVER 4270AG толщиной 0,8 мм с общим коэффициентом отражения до 95–98% с помощью теплопроводящего клея установлен медный посеребренный корпус типа LEAD FRAME 3003 (Тайвань). Такой подход обеспечил в светодиодном модуле низкое тепловое сопротивление «кристалл — корпус» (менее 1 К/Вт) и возможность увеличения его световой эффективности в составе светодиодной лампы за счет дополнительного переотражения светового излучения в колбе рассеивателя.

С учетом особенностей конструкции СДМ и результатов расчетов параметров люминофорных гелей (на основе силиконового двухкомпонентного полимера типа EM-6637, Китай) были исследованы тестовые образцы СДМ с различной концентрацией желтых и оранжево-красных люминофоров на основе алюмоиттриевых гранатов и оксинитридов типов ZYP550SG2 (желтый) и ZYP630H (оранжево-красный) компании Nakamura Co.Ltd (Япония). Были проведены исследования спектральных характеристик образцов и подтверждены оптимальные дозировки люминофоров в люминофорных слоях толщиной 1,8 мм в интервале массовых соотношений люминофора и силиконового полимера  $m_{550SG2}:m_{\text{силикон}}$  от 1:15 до 1:30 для желтого люминофора. Для смеси желтого и оранжево-красного люминофоров были установлены соотношения масс люминофоров между собой и силиконовым полимером  $m_{630H}:m_{550SG2}:m_{\text{силикон}}$  в интервале от 1:10:240 до 1:10:300, что удовлетворяет диапазонам цветовой температуры и индекса цветопередачи, указанным в **табл. 1**.

Таблица 1

Типовые результаты контроля параметров плоских СДМ (по 25 модулей в каждой партии) при различных значениях рабочего тока и мощности

Параметр	Значения параметров при токе питания/мощности:			
	0,35 мА/4 Вт	0,35 мА/5 Вт	0,06 мА/4 Вт	0,06 мА/5 Вт
Напряжение питания $U$ , В	11,8 – 11,9	14,6 – 14,7	69,2 – 72,2	85,5 – 85,9
Полный световой поток $\Phi_v$ , лм	500 – 520	615 – 625	520 – 540	670 – 705
Световая эффективность $\eta$ , лм/Вт	120 – 125	120 – 123	120 – 130	130 – 137
Цветовая температура $T_c$ , К	4500 – 5500	4500 – 5500	4500 – 5500	4500 – 5500
Индекс цветопередачи $R_a$	62 – 68	62 – 68	62 – 68	62 – 68

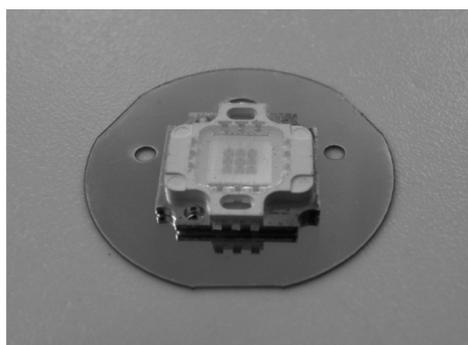


Рис. 1. Образец многокристального зеркализованного светодиодного модуля

Исследование параметров собственно СДМ и СДМ в составе корпусов светодиодных ламп проводилось на измерительной базе Харьковского регионального научно-производственного центра стандартизации, метрологии и сертификации и ИФП НАНУ. Исследовалось влияние конструктивных и технологических решений на световую эффективность опытных образцов светодиодных модулей, а также обоснованность выбора вариантов конструктивно-технологических решений, материалов и технологических схем изготовления светодиодных модулей для повышения их энергетических и светотехнических характеристик.

Приемо-сдаточные испытания партии светодиодных модулей подтвердили их высокие светотехнические параметры. Без учета КПД схемы управления светоотдача плоских СДМ мощностью 4 и 5 Вт составляла 120 – 130 лм/Вт для диапазона коррелированной цветовой температуры 4500 – 5500 К (табл. 1).

Предложенная конструкция и разработанная технология изготовления составного основания плоских СДМ позволили улучшить тепловые параметры новых светодиодных ламп, прототипом которых являются отечественные лампы с цоколем E27 малой мощности, напряжением питания 13 – 100 В, рабочим током 50 – 350 мА и светоотдачей до 130 лм/Вт.

На рис. 1 представлен образец многокристального зеркализованного плоского СДМ.

В табл. 2 представлены электрические и оптические характеристики тестовых плоских

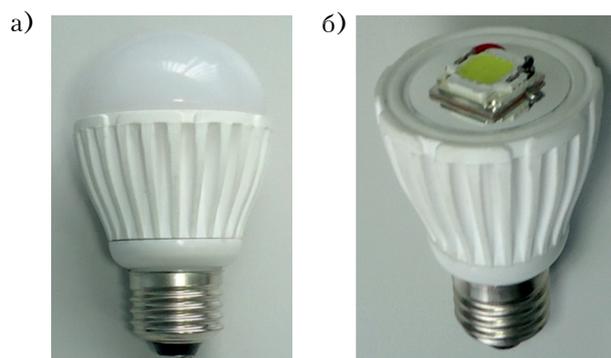


Рис. 2. Образцы светодиодных ламп со светорассеивающей колбой (а) и без нее (б)

Таблица 2

Электрические и световые характеристики светодиодных модулей в лампах двух конфигураций (см. рис. 2) при токе питания 0,35 мА и мощности 4,3 Вт

Конфигурация лампы		$\Phi_v$ , лм	$\eta$ , лм/Вт	$T_c$ , К	$R_a$
С колбой	матированное основание	329,2	76,6	5053	67,2
	зеркализованное основание	343,2	79,8	5050	68,6
Без колбы	матированное основание	416,8	96,9	5265	66,8
	зеркализованное основание	421,8	98,1	5270	68,0

светодиодных модулей в корпусах типа LEAD FRAME 3003, установленных на зеркализованном или матированном теплопроводном алюминиевом основании в светодиодных лампах двух конфигураций – со светорассеивающей колбой и без нее (рис. 2).

Как видно из табл. 2, в лампах со светорассеивающей колбой при применении высокоэффективных отражателей зеркализация основания СДМ обеспечивает увеличение световой эффективности почти на 4,2% за счет дополнительного переотражения светового излучения в колбе. Для светодиодной лампы без колбы это увеличение незначительно (1,2%), поскольку переотражение отсутствует.

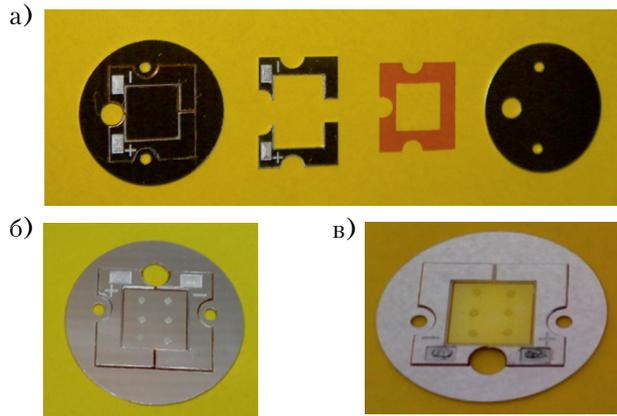


Рис. 3. Образцы многокристального зеркализованного светодиодного модуля и его составных элементов: *а* – элементы модуля; *б* – модуль в сборе с кристаллами; *в* – модуль в сборе со сформированным люминофорным слоем

Таким образом, результатом проведенных исследований и разработок стало создание на технологической базе ООО «Светодиодные технологии Украина» принципиально новых для Украины многокристальных светоэффективных (с увеличенным коэффициентом использования светового потока) светодиодных модулей LEM (light effective module), изготовленных по технологии сборки COB.

На основании полученных результатов нами было предложено техническое решение по созданию улучшенного многокристального СДМ, а именно: каждый светодиодный кристалл в излучательной области модуля устанавливается тыльной стороной на плоском теплопроводном зеркализованном основании. Применение плоского теплопроводного подкристального высокоэффективного рефлектора с общим коэффициентом отражения до 95–98% позволило повысить как оптическую, так и энергетическую эффективность светодиодных модулей по сравнению с существующими аналогами более чем на 10%. Кроме этого, предложенное техническое решение обеспечило оптимальный подбор типов светодиодных кристаллов и различных вариантов соединений кристаллов в электрические схемы, а также долговременную стабильность модулей в течение всего срока службы.

На рис. 3 представлены образцы предложенных многокристальных зеркализованных светодиодных модулей и их составных элементов.

По итогам работы получены патенты Украины [10, 11].

#### Объемные светодиодные модули

Для повышения конкурентоспособности светодиодных ламп-ретрофитов необходимо, чтобы выполнялись условия соответствия их размеров и электрической совместимости с лампами накаливания. Сравнительно малые габариты корпуса ламп накаливания создают в светоди-

одных лампах-ретрофитах ряд проблем, связанных с отводом тепла, светорассеиванием и светопропусканием. Радиаторы, применяемые для отвода тепла, не только громоздки, но и затрудняют получение требуемого светораспределения лампы (многие типы ламп с плоскими светодиодными модулями не обеспечивают угол рассеивания светового потока более 120–160°). В ряде случаев требуется дополнительная светорассеивающая оптика, что снижает светоотдачу лампы и ощутимо повышает ее стоимость.

Одним из путей решения этих проблем является применение в лампах объемных светодиодных модулей. Разработанные новые технические подходы позволили комплексно и достаточно просто улучшить энергетическую и световую эффективность, а также увеличить угол рассеивания светового потока до 270° в лампах-ретрофитах мощностью 10–15 Вт и более в колбах с типоразмерами А60 и А95.

В качестве светодиодных источников света были выбраны высокоэффективные SMD- и COB-светодиоды производства CREE Inc. (США), а также нашедшие широкое применение высокоэффективные коммерческие SMD-светодиоды серии 5630 3G компании LG Innotek Co Ltd (Корея). В излучателях СДМ применялись серийные светодиоды третьего поколения, имеющие повышенный световой поток и световую эффективность не менее 120–150 лм/Вт.

Держатели-теплоотводы светодиодного излучателя выполнялись в виде единого формообразующего объемного зеркализованного элемента, основание которого механически удерживают три или более отражателей-радиаторов заданной формы, расположенные на заданном удалении друг от друга и изогнутые под требуемым углом к продольной оси рассеивающей колбы. Сформированные на фронтальных поверхностях теплопроводных отражателей-радиаторов зеркальные покрытия с общим коэффициентом отражения до 98% обеспечивают увеличение световой эффективности светодиодного излучателя в составе лампы, а также несколько улучшают условия отвода тепла от источников света. По сравнению с СДМ плоского типа в этом случае площадь отвода кондуктивного тепла от светодиодов увеличивается в 4–6 раз. Световая эффективность излучателя в составе светодиодной лампы повышается из-за дополнительного переотражения высокоэффективными зеркализованными отражателями-радиаторами в колбе рассеивателя света. Равномерность распределения светового потока и снижение блескости излучателя лампы обеспечиваются за счет разнонаправленной ориентации в пространстве оптических осей светодиодов.

Равномерное расположение светоизлучающих полупроводниковых приборов малой мощности на фронтальной зеркальной стороне каждого отражателя-радиатора и соединение их в электрическую схему с помощью гибкой ком-

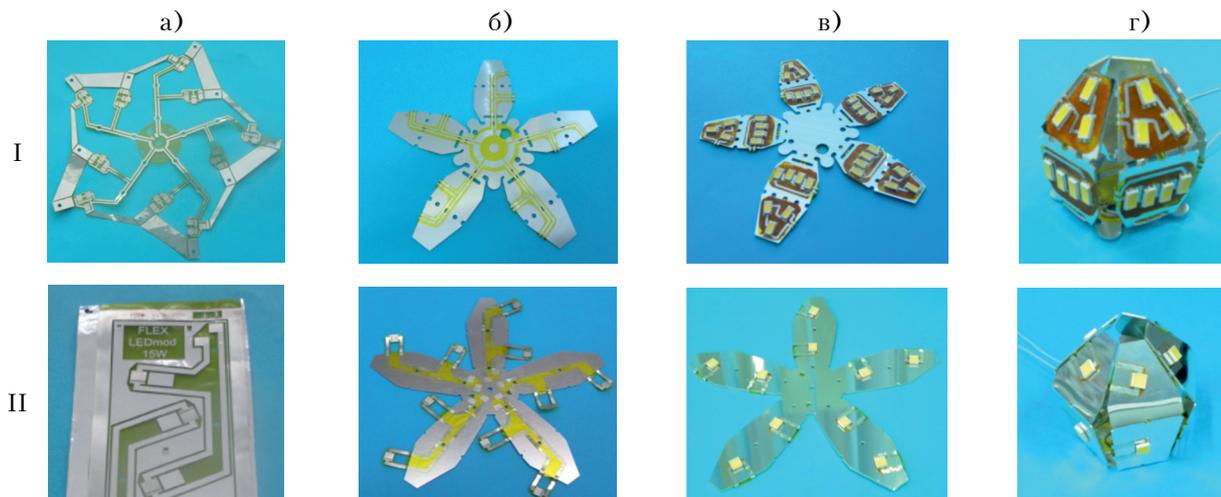


Рис. 4. Образцы зеркализованных объемных светодиодных модулей мощностью 10 Вт на SMD-светодиодах (I) и мощностью 15 Вт на MCOB-светодиодах (II), их состав, компоновка и последовательность сборки: а – гибкая плата; б – гибко-жесткая плата; в – гибко-жесткая плата со светодиодами; г – объемный светодиодный модуль

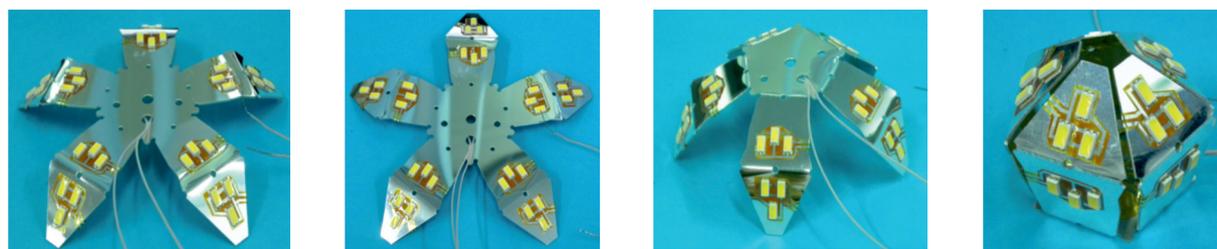


Рис. 5. Последовательность формирования объемного светодиодного модуля из плоского на гибко-жесткой зеркализованной плате

мутирующей платы, общий коэффициент отражения поверхности которой составляет не менее 80%, обеспечивает возможность дополнительно увеличения светового потока, выходящего из лампы, и снижения блескости излучателя. Такое техническое решение позволяет использовать менее мощные светодиоды при большем их количестве в объемных модулях.

Были разработаны несколько вариантов конструкций экспериментальных объемных светодиодных модулей на основе гибко-жестких коммутационных плат на объемных держателях-теплоотводах различной мощности: 15 Вт при использовании высокоэффективных мини-СОВ- и СОВ-светодиодов (до 1,5 Вт) и до 10 Вт при использовании SMD-светодиодов (до 0,5 Вт).

На рис. 4, 5 представлены последовательности изготовления различных типов СДМ, внешний вид модулей, их состав и компоновка.

Для изготовления отражателей сложной формы необходимо было также решить проблемы, связанные с недостатками традиционно применяемых для этого материалов. Например, анодированному алюминиевому сплаву свойственны низкая пластичность (как правило, значение допустимого относительного удлинения находится в пределах 2%) и повреждения верхне-

го защитного слоя при вытяжке и сгибании, поскольку он является многослойным материалом, состоящим из подложки, придающей большую жесткость, и ряда тонких (микронной толщины) слоев, придающих материалу высокую отражательную способность. Материалы MIRO-SUN и MIRO SILVER имеют со стороны зеркального покрытия защиту поверхности тонким слоем  $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$  и лаковой пленкой. При сгибании плоской пластины с зеркализованной стороной снаружи допускается минимальный внутренний

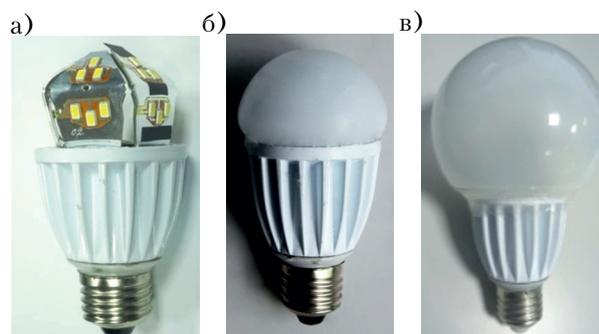


Рис. 6. Экспериментальные образцы ламп с объемным светодиодным модулем мощностью 10 Вт (а, б) и 15 Вт (в) со светорассеивающей колбой типа А60 (б) и А95 (в) и без нее (а)

Таблица 3

Электрические и световые характеристики объемных СДМ мощностью 10 и 15 Вт в лампах различной конфигурации (см. рис. 6) после 60 минут непрерывной работы

Конфигурация лампы	$I$ , А	$U$ , В	$P$ , Вт	$\Phi_v$ , лм	$\eta$ , лм/Вт	$T_c$ , К	$R_a$
10 Вт, SMD LG							
Без колбы	0,33	30,1	9,93	1035	105	5933	87
С колбой А60		29,9	9,87	783	79	5213	86
С колбой А95		30,0	9,9	956	97	5381	87
10 Вт, SMD CREE							
Без колбы	0,36	27,6	9,94	1614	162	4575	72
С колбой А60		27,5	9,0	1193	121	4446	71
С колбой А95		27,5	9,0	1509	152	4563	71
15 Вт, MCOB CREE							
Без колбы	0,85	17,0	14,45	2022	140	4816	74
С колбой А95		17,0	14,42	1834	127	4759	74
15 Вт, COB CREE							
Без колбы	0,44	34,0	14,94	2316	155	4539	72
С колбой А95		33,8	14,87	2099	141	4536	72

Таблица 4

Параметры светодиодных ламп компаний OSRAM и PHILIPS на начало 2016 г. [14]

Тип лампы	$P$ , Вт	$\Phi_v$ , лм	$\eta$ , лм/Вт	$T_c$ , К	$R_a$
OSRAM A75 E27	10	1055	109	2797	82
	12,4	1145	92	2800	87
PHILIPS A60 E27	9	806	95	2840	83

диаметр кривизны до 2 мм, с зеркализованной стороной внутри – до 14 мм, а при диаметре кривизны 6 мм уже наблюдается повреждение защитного покрытия.

Для того чтобы исключить указанные проблемы, на линиях сгибов выполнялись технологические отверстия, облегчающие формирование ребер на начальных участках, и разгрузочные пазы в местах крутых изгибов.

На рис. 6 представлены экспериментальные образцы светодиодных ламп различных конструкций с объемными зеркализованными светодиодными модулями мощностью 10 и 15 Вт, а в табл. 3 – их электрические и оптические характеристики.

Светодиодные модули выполнены из материала MIRO-SILVER 4270AG с общим коэффициентом отражения до 98% и толщиной 1,0 мм. В качестве источников света в СДМ мощностью 10 Вт были использованы коммерческие светодиоды мощностью до 0,5 Вт двух типов: LEMWS59R80HZ2B00 компании LG Innotek (Корея) в пластмассовом корпусе типоразмера 5630 со световым потоком до 72 лм (при

25°С), световой эффективностью до 160 лм/Вт при  $T_c = 5000$  К, индексом цветопередачи более 80 (SMD LG) и XTEAWT-00-0000-00000 ВJE3 компании CREE Inc. (США) в корпусе типоразмера 3,45×3,45 мм со световым потоком до 80 лм (при 85°С), световой эффективностью до 170 лм/Вт при  $T_c = 5000$  К и индексом цветопередачи более 70 (SMD CREE).

Из сравнения представленных в табл. 3 данных с данными табл. 2 можно сделать вывод, что объемные СДМ по своим электрическим и световым характеристикам значительно превосходят плоские СДМ. Предложенная конструкция отражателей-радиаторов СДМ, в свою очередь, обеспечила улучшение электрических и оптических характеристик бытовых светодиодных ламп с размером колб типа А60 и А95 при более высокой мощности.

По итогам работы получен патент Украины [12] и подана заявка на изобретение [13].

В настоящее время производством ламп-ретрофитов во всем мире занимается множество компаний. Что касается рейтинга производителей светодиодных ламп бытового приме-

ния в странах СНГ, в 2016 г. на первых по качеству позициях здесь находятся такие европейские компании-разработчики, как OSRAM и PHILIPS. Наилучшие технические характеристики при тестировании стабильно показывают серийно выпускаемые лампы-ретрофиты типа OSRAM LED Superstar Classic A75 E27 мощностью 10 и 12,4 Вт и PHILIPS LED A60 E27 мощностью 9 Вт на основе плоских светодиодных модулей. В табл. 4 представлены основные параметры, характеризующие их технический уровень на начало 2016 г.

Из приведенных данных можно сделать вывод, что уровень предложенных авторами технических решений соответствует европейскому.

#### Заключение

Таким образом, разработанные принципиально новые объемные светодиодные модули на основе светодиодов третьего поколения позволили увеличить световой поток до 1150–1200 лм при светоотдаче 120–135 лм/Вт в лампах мощностью 10 Вт и до 1800–2000 лм при светоотдаче 130–140 лм/Вт в лампах мощностью 15 Вт, что свидетельствует об их конкурентоспособности с лампами европейских производителей. Дальнейшие исследования будут проводиться в направлении совершенствования их конструкции и улучшения условий отвода тепла от светогенерирующих областей, а также на создание конкурентоспособных объемных светодиодных модулей для высокоэффективных бытовых ламп более высокой мощности (15 Вт и выше).

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сорокин В. М. Светодиодное освещение. Проблемы. Решения. Перспективы // Промышленная электроэнергетика та електротехніка. – 2014. – № 5. – С. 28–38.
2. Наумова А. Н., Николаенко Ю. Е., Кравец В. Ю. и др. Охлаждение светодиодного модуля с помощью различных теплоотводов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2015. – № 5–6. – С. 35–40. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.5-6.35>
3. Лозовой М. А., Николаенко Ю. Е., Рассамкин Б. М., Хайрнатов С. М. Исследование рабочих характеристик

тепловых труб для светодиодных осветительных приборов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2014. – № 5–6. – С. 32–38. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2014.2.32>

4. Kozak D. V., Nikolaenko Yu. E. The working characteristics of two-phase heat transfer devices for LED modules // 2016 IEEE International Conference on Electronics and Information Technology (EIT'16). – 2016. – Ukraine, Odessa. – P. 10–13. <http://dx.doi.org/10.1109/ICEAIT.2016.7500980>

5. Зубиков А. Мировой рынок светотехники Исследуемые регионы: США, Латинская Америка, Китай, Индия, Западная Европа, Россия // Световые технологии. – Ноябрь 2014. <http://ltcompany.com/media/uploads/2015/05/08/2014-11122014-11-14-3.pdf>

6. Сысун В. В. Состояние разработок компактных светодиодных излучателей и ламп с удаленным люминофором // Полупроводниковая светотехника. – 2013. – № 6. – С. 39–48.

7. Антипин С., Королев Г. Светодиодные матрицы против одиночных светодиодов // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 5. – С. 52–57.

8. Глухов А. Конструкция светодиодной лампы для прямой замены лампы накаливания общего назначения // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 2. – С. 45–48.

9. Борщев В. Н., Листратенко А. М., Антонова В. А. и др. Отечественные многокристалльные мощные светодиодные модули и светильники на их основе // Світлотехніка та електроенергетика. – 2011. – № 3. – С. 4–12.

10. Пат. 94999 Украины на полезную модель. Многокристалльный светодиодный модуль / Г. И. Никитский, В. Н. Борщев, А. М. Листратенко, В. М. Сорокин и др. – 2014.

11. Пат. 111099 Украины. Многокристалльный светодиодный модуль / Г.И. Никитский, В. Н. Борщев, А. М. Листратенко, В. М. Сорокин и др. – 2016.

12. Пат. 108776 Украины. Лампа с объемным светодиодным модулем / Г.И. Никитский, В.Н. Борщев, А.М. Листратенко, В.М. Сорокин и др. – 2016.

13. Заявка на изобретение № а 201601853 Украины. Лампа с объемным светодиодным модулем / Г. И. Никитский, В. Н. Борщев, А. М. Листратенко, В. М. Сорокин и др. – 2016.

14. Сводный тест светодиодных ламп 2016. – Режим доступа: <http://ichip.ru/svodnyjj-test-svetodiodnykh-lamp-2016.html>

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 27.10 2016 г.*

*В. М. БОРЩОВ<sup>1</sup>, О. М. ЛИСТРАТЕНКО<sup>1</sup>, І. Т. ТИМЧУК<sup>1</sup>,  
М. А. ПРОЦЕНКО<sup>1</sup>, Г. І. НІКІТСЬКИЙ<sup>1</sup>, О. О. ФОМІН<sup>1</sup>,  
Л. А. НАЗАРЕНКО<sup>2</sup>, В. М. СОРОКІН<sup>3</sup>, А. В. РИБАЛОЧКА<sup>3</sup>, О. С. ОЛІЙНИК<sup>3</sup>*

*Україна, м. Харків, <sup>1</sup>ТОВ «Світлодіодні технології Україна»,  
<sup>2</sup>Харківська національна академія міського господарства ім. О. М. Бекетова;  
м. Київ, <sup>3</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ*

## НОВІ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ СВІТЛОДІОДНИХ МОДУЛІВ ДЛЯ ЛАМП-РЕТРОФІТІВ

*Запропоновано принципово нові конструктивно-технологічні рішення компактних об'ємних дзеркалізованих світлодіодних модулів підвищеної потужності. На їх основі при застосуванні високо-ефективних світлодіодів третього покоління виготовлено експериментальні зразки ламп-ретрофитів потужністю 10 та 15 Вт зі світловіддачею від 105 до 160 лм/Вт.*

*Ключові слова: об'ємний світлодіодний модуль, світлодіодна лампа, конструктивно-технологічні рішення.*

DOI: 10.15222/TKEA2016.6.03  
UDC 628.9.041

<sup>1</sup>V. M. BORSHCHOV, <sup>1</sup>O. M. LISTRATENKO,  
<sup>1</sup>M. A. PROTSENKO, <sup>1</sup>I. T. TYMCHUK, <sup>1</sup>G. I. NIKITSKIY,  
<sup>1</sup>O. O. FOMIN, <sup>2</sup>L. A. NAZARENKO, <sup>3</sup>V. M. SOROKIN,  
<sup>3</sup>A. V. RYBALOCHKA, <sup>3</sup>O. S. OLEINIK

Ukraine, Kharkiv <sup>1</sup>LED Technologies of Ukraine», Ltd,  
<sup>2</sup>O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,  
Kyiv, <sup>3</sup>V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine

## THE NEW DESIGN AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR THE LED MODULES FOR RETROFIT LAMPS

*The authors propose fundamentally new design-technological solutions for compact volumetric mirrorized LED modules with increased power. Test samples of volumetric light-effective LED light effective modules with a power of 10–15 W and light output of 105–160 lm/W for domestic retrofit lamps based on high-efficiency SMD, mini COB, and COB LEDs of third generation were manufactured and tested.*

*Positive technical and practical results were obtained by increasing by over 4–6 times the size of holders – heat sinks (compared to LED modules of flat holders) for heat dissipation from the LEDs by conduction and heat radiation, as well as by increasing light efficiency of LED lamps due to the additional light re-reflection by mirrorized reflectors-radiators in the bulb which is diffuser of the lamp light.*

*Key words: volumetric LED module, LED lamp, design-technology solutions.*

### REFERENCES

1. Sorokin V. M. [LED lighting. Problems. Solutions. Prospects]. *Promislova elektroenergetika ta elektrotehnika*, 2014, vol. 5 (89), pp. 28-38. (Rus)
2. Naumova A.N., Nikolaenko Yu. E., Kravets V.Yu., Sorokin V.M., Olejnik A.S. [Cooling LED module using various heat sinks]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2015, no 5-6, pp. 35-40. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.5-6.35> (Rus)
3. Lozovoy M.A., Nikolaenko J.E., Rassamakin B.M., Hayrnasov S.M. Study the performance of heat pipes for LED lighting // *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2014, no 5-6, pp. 32-38. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2014.2.32> (Rus)
4. Kozak D.V., Nikolaenko Yu. E. The working characteristics of two-phase heat transfer devices for LED Modules // *Proceed. of 2016 IEEE International Conference on Electronics and Information Technology (EIT'16)*, Ukraine, Odessa, 2016, pp. 10-13. <http://dx.doi.org/10.1109/ICEAIT.2016.7500980>
5. Zubikov A. [The global market for light engineering. Study regions: the USA, Latin America, China, India, Western Europe, Russia]. *Svetovye tekhnologii*, November 2014, <http://ltcompany.com/media/uploads/2015/05/08/2014-11122014-11-14-3.pdf> (Rus)
6. Sysun V. V. [Status of development of compact LED emitters and lamps with remote luminophore]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*, 2013, vol. 6, pp. 39–48. (Rus)
7. Antipin S., Korolev G. [LED matrix against single LEDs]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*, 2011, vol. 5, pp 52-57. (Rus)
8. Gluhov A. [Construction of LED lamps for direct replacement of incandescent general purpose lighting]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*, 2011, vol. 2, pp. 45-48. (Rus)
9. Borshchov V. N., Listratenko O. M., Antonova V. A., Kostyshin Ya. Ya., Tymchuk I. T., Protsenko M. A., Kolosov M. I., Nikitskiy G. I., Nazarenko L. A. [Domestic multichip modules and high-power LED lamps on their basis]. *Svitlotekhnika ta elektroenergetika*, 2011, vol. 3, pp. 4-12. (Ukr)
10. Nikitskiy G. I., Borshchev V. N., Listratenko O. M., Sorokin V. M. et al. [Multi-chip LED module]. Ukr. Patent, no 94999.
11. Nikitskiy G. I., Borshchev V. N., Listratenko O. M., Sorokin V. M. et al. Multi-chip LED module. Ukr. Patent, 111099.
12. Nikitskiy G. I., Borshchev V. N., Listratenko O. M., Sorokin V. M. et al. [Lamp with volumetric LED module. Ukr. Patent for utility model], no 108776.
13. Nikitskiy G. I., Borshchev V. N., Listratenko O. M., Sorokin V. M. et al. [Lamp with volumetric LED module]. Application of Ukraine for invention no a 201601853.
14. [Summary test of LED lamps, 2016]. Access mode: <http://ichip.ru/svodnyjj-test-svetodiodykh-lamp-2016/html> (Rus)

О. П. КАРЛАНГАЧ

Україна, Одеський національний політехнічний університет

E-mail: sasha7725@i.ua

## ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ НА ОСНОВІ СТАНДАРТНИХ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕСУРСІВ INTERNET

*Представлено методику проектування електронної апаратури на основі функціонально-вузлового методу, що передбачає використання 2D- та 3D-моделей несучих конструкцій фірм-виробників, як спосіб зниження часу та трудомісткості розробки і підвищення якості конструкторської документації на електронну апаратуру.*

*Ключові слова: проектування електронної апаратури, несучі конструкції, конструкторська документація, Internet.*

На сьогоднішній час більшість галузей науки і техніки комп'ютеризується, все більше задач конструювання електронної апаратури (ЕА) вирішується у системах автоматизованого проектування — схемотехнічного, конструкторського, технологічного. Розробка конструкторської документації (КД) також потребує ефективних підходів, оскільки чим менше термін її розробки, тим швидше той чи інший прилад (пристрій) надійде у виробництво.

Значна частина розроблюваної ЕА компонується в несучих конструкціях (НК), які є стандартними і використовуються як покупні комплектуючі вироби. При традиційному способі проектування розробник приладу повинен створювати складальне креслення на корпус (каркас) і на сам прилад, самостійно зображуючи складові частини і використовуючи для цього дані каталогів на продукцію (принаймні для того, щоб зображення відображали сутність стандартних складових частин з урахуванням забезпечення взаємозамінності), тобто при створенні КД на електронний пристрій і його складові частини конструктор повинен цілком визначено зображати (викреслювати) елементи НК, на які документація вже розроблена і знаходиться у виробника несучих конструкцій, але відсутня у розробника ЕА. Таким чином, можна констатувати, що традиційний підхід до створення КД не є раціональним. Якщо ж розглядати розробку виробу цілком, то можна отримати відчутну економію витрат на випуск КД, використовуючи документацію на елементи НК фірм-виробників.

На жаль, питання використання КД фірм-виробників НК (при комп'ютерному проектуванні складових частин НК) не представлені в достат-

ній мірі в публікаціях з різних причин. Для вітчизняної промисловості це, в першу чергу, відсутність серійного виробництва, яке вимагає наявності повного комплексу робочої КД. Але це тимчасова ситуація, і при правильній організації проектування та виробництва ЕА цей недолік буде ліквідований.

Метою даної роботи є розробка методики проектування із використанням ресурсів Internet при створенні комплексу робочої конструкторської документації на електронну апаратуру для скорочення термінів та трудомісткості проектування, а також підвищення якості КД.

Отже, перспективним варіантом проектування апаратури є її розробка з використанням готових частин на основі функціонально-вузлового методу. Такими частинами можуть бути 2D- та 3D-моделі та креслення деталей. Отримання моделей безпосередньо у розробників є зручним варіантом, але не завжди доступним. Також для цього можна використовувати електронні каталоги компаній та різноманітні Internet-сервіси. Оптимальним варіантом одержання моделей є комбінація вказаних можливостей. У разі відсутності необхідних конструктивів можливе звертання до фірм-виробників НК або самостійна розробка моделей.

Алгоритм запропонованого принципу розробки КД у вигляді блок-схеми представлено на **рис. 1**. Для проектування ЕА та випуску КД може використовуватися база даних (БД), яка складається з 2D- та 3D-моделей НК фірм-виробників. Такі БД також існують на спеціальних Internet-ресурсах, де зібрано готові моделі багатьох компаній. Подальша обробка та редагування моделей виконується в САД-системі

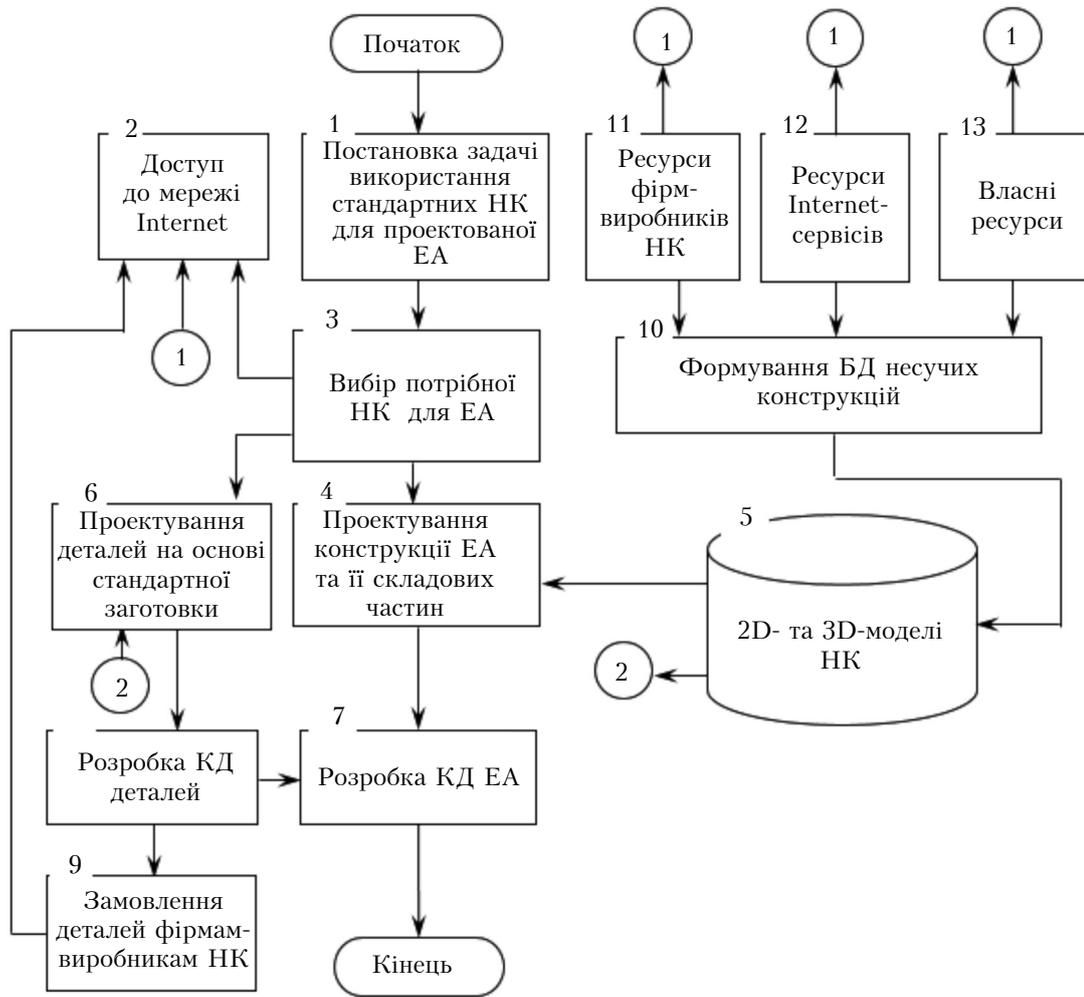


Рис. 1. Блок-схема алгоритму розробки конструкторської документації

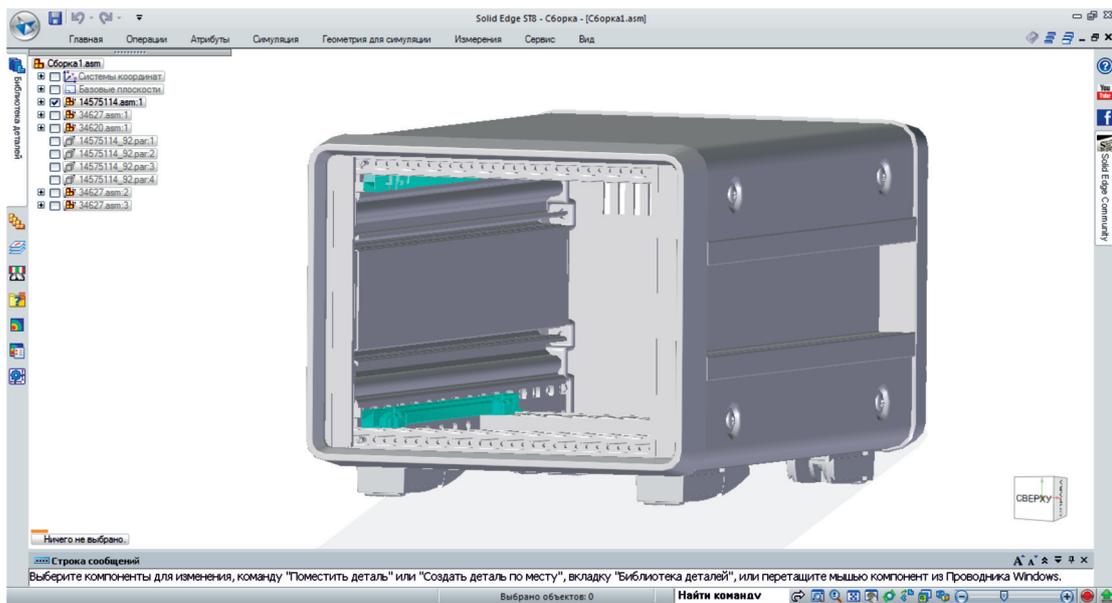


Рис. 2. Стандартный корпус RatiорасPRO высотой 3U у САПР Solid Edge [5]



Рис. 3. Вид приладу з необхідними компонентами

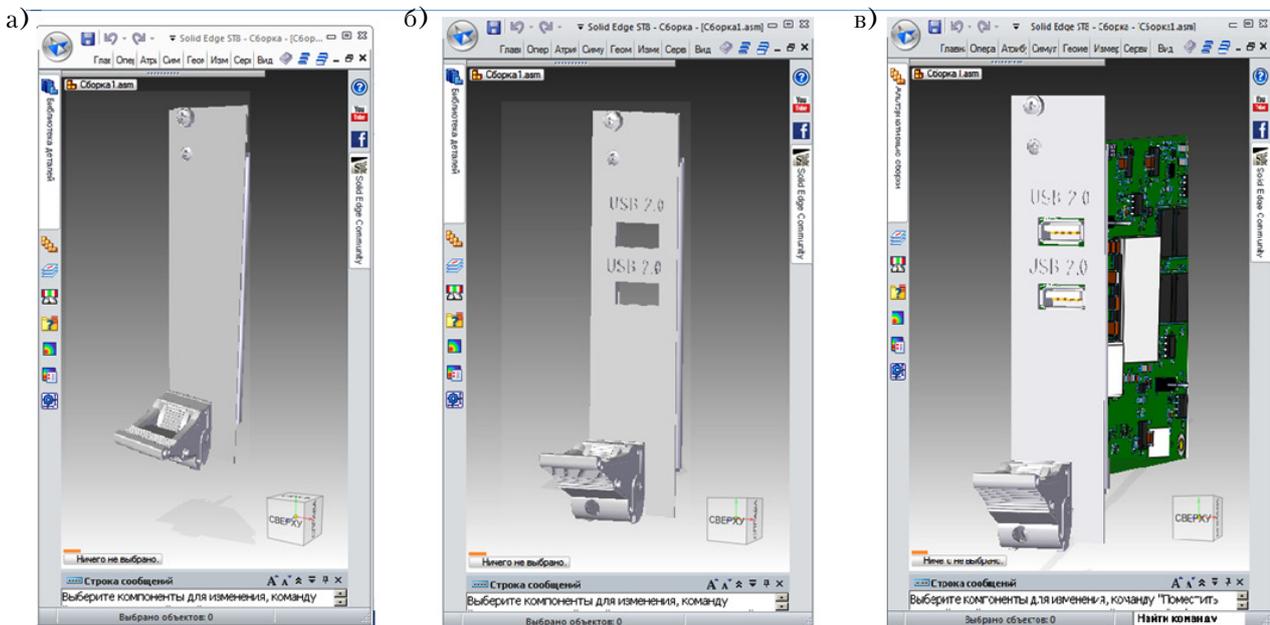


Рис. 4. Процес модифікації передньої панелі:

*a* – заготовка 3D-моделі передньої панелі, яка відкрита у САПР для подальшого доопрацювання; *б* – відредагована передня панель; *в* – передня панель у складі ЕМ

(у роботі використовується САПР Solid Edge від компанії Siemens PLM Software [1]).

В роботі також розглядається можливість індивідуального виконання деталей на фірмах-виробниках стандартних несучих конструкцій [2], що передбачено в представленому алгоритмі.

Алгоритм складається з наступних блоків.

**Блок 1.** Постановка задачі використання стандартних НК для проектованої ЕА (розглядається можливість використання при розробці приладу тих чи інших уніфікованих стандартизованих НК).

**Блок 2.** Доступ до мережі Internet.

**Блок 3.** Вибір із бази даних (БД) моделі оптимальної НК.

**Блок 4.** Проектування конструкції розроблюваного приладу, модифікація і доопрацювання складових частин.

**Блок 5.** БД із 2D- та 3D-моделей НК, яка формується у **Блоці 10** на основі ресурсів фірм-виробників НК (**Блок 11**) і ресурсів Internet-сервісів (**Блок 12**), а також власних ресурсів (**Блок 13**).



**Блок 6.** Проектування деталей виробу на основі складових частин стандартної заготовки, їх модифікація (створення необхідних отворів, позначень) відповідно до вимог конструкції проєктованого виробу.

**Блок 7.** Розробка КД (текстових та графічних документів) на проєктований пристрій, включаючи КД на складові частини — окремі деталі конструкції (**Блок 8**).

**Блок 9.** Замовлення конструкції виробу та складових частин фірмам-виробникам НК за розробленою КД.

Для демонстрації такої моделі проєктування наведемо приклад проєктування приладу настільного типу Ratiopac PRO [3]. Будемо використовувати готову 3D-модель, яку можна завантажити з сайту виробника чи, як у нашому випадку, з спеціалізованого Internet-сервісу [tracereparts.com](http://tracereparts.com) [4], де зібрано 3D-моделі багатьох компаній, які займаються розробкою різноманітних конструктивів для багатьох напрямків техніки (промисловості).

3D-моделі у БД сервісу найчастіше являють собою готові складальні одиниці і рідше — окремі конструктиви. При відкритті моделі у більшості САПР вона розкладається на окремі нероздільні частини, які можна використовувати у інших складальних одиницях. Тому до БД доцільніше додавати одразу повну складальну одиницю, а також список конструктивів, які входять до її складу.

У Internet-сервісі [tracereparts.com](http://tracereparts.com) є можливість завантаження конструктивів у багатьох САД-форматах, що дуже зручно для розробників, які користуються різними САПР.

На **рис. 2** зображено корпус виробу у первинному вигляді від виробника, який можна завантажити з інтернет-сервісу [5]. Наприклад, необхідно зробити прилад, загальний вигляд якого зображено на **рис. 3**, з повним переліком складальних одиниць та необхідними складовими частинами (їх моделі теж завантажено з вище вказаного Internet-сервісу) — вставними електронними модулями (ЕМ) [6] (до складу яких входять передня панель, друкована плата, ручка для установки і виймання модуля), USB-портами [7], електричним з'єднувачем D-sub [8], електричним з'єднувачем Ethernet [9].

Необхідно зробити модифікацію деталей конструкції, а саме отвори та написи в доданих передніх панелях ЕМ. На **рис. 4** представлено процес модифікації передньої панелі.

На основі 3D-моделей приладу (**рис. 3**) та передньої панелі (**рис. 4**) розробляється КД відповідно до вимог ЄСКД — складальне креслення приладу (**рис. 5**), специфікація

(**рис. 6**), креслення передньої панелі (**рис. 7**). Аналогічно проводиться розробка документації і на інші складальні одиниці. Вся документація в Solid Edge генерується на основі даних, які зберігаються в файлах з моделями деталей і збірок, тому процес підготовки КД в цій системі досить зручний і ефективний.

Таким чином, завдяки використанню 2D- та 3D-моделей елементів несучих конструкцій фірм-виробників, запропонована методика дозволяє більш швидко та якісно, ніж традиційний спосіб розробки конструкторської документації, проводити проєктування електронної апаратури, а значить, і прискорити її впровадження у виробництво.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. САПР від компанії Siemens PLM Software – Solid Edge. — [https://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/products/solid-edge/](https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/solid-edge/).
2. Новости компании Schroff // Электронные компоненты и системы. — 2013. — №7. — С. 57.
3. Корпус Ratiopac PRO фірми Schroff.— <http://schroff.pentair.com/en/schroff-apac/Ratiopac-PRO>.
4. Internet-сервіс [tracereparts.com](http://tracereparts.com). — <http://www.tracereparts.com/>.
5. Корпус Ratiopac PRO фірми Schroff.— [http://www.tracepartsonline.net/\(S\(ihi0u2thhrtamm3egpiu3q4e\)\)/PartDetails.aspx?PartFamilyID=30-24112016-097940&PartID=30-24112016-097940&SrchRsltType=4&SrcRsltId=2](http://www.tracepartsonline.net/(S(ihi0u2thhrtamm3egpiu3q4e))/PartDetails.aspx?PartFamilyID=30-24112016-097940&PartID=30-24112016-097940&SrchRsltType=4&SrcRsltId=2).
6. Передня панель висотою 3U.— [http://www.tracepartsonline.net/\(S\(ihi0u2thhrtamm3egpiu3q4e\)\)/PartDetails.aspx?PartFamilyID=10-17122013-104970&PartID=10-17122013-104970&SrchRsltType=4&SrcRsltId=2](http://www.tracepartsonline.net/(S(ihi0u2thhrtamm3egpiu3q4e))/PartDetails.aspx?PartFamilyID=10-17122013-104970&PartID=10-17122013-104970&SrchRsltType=4&SrcRsltId=2).
7. USB-порт.— [http://www.tracepartsonline.net/\(S\(r2qk5xbacnrey4l0newwh2p\)\)/PartDetails.aspx?Class=RS\\_COMPONENTS&clsid=&ManID=ASSMAN N&PartFamilyID=10-02092010-081515&PartID=10-02092010-081515&SrchRsltId=5&SrchRsltType=0](http://www.tracepartsonline.net/(S(r2qk5xbacnrey4l0newwh2p))/PartDetails.aspx?Class=RS_COMPONENTS&clsid=&ManID=ASSMAN N&PartFamilyID=10-02092010-081515&PartID=10-02092010-081515&SrchRsltId=5&SrchRsltType=0)
8. Електричний з'єднувач D-sub.— [http://www.tracepartsonline.net/\(S\(ihi0u2thhrtamm3egpiu3q4e\)\)/PartDetails.aspx?Class=RS\\_COMPONENTS&clsid=&ManID=RS\\_COMPONENTS&PartFamilyID=10-09102014-119468&PartID=10-09102014-119468&SrchRsltType=4&SrcRsltId=4](http://www.tracepartsonline.net/(S(ihi0u2thhrtamm3egpiu3q4e))/PartDetails.aspx?Class=RS_COMPONENTS&clsid=&ManID=RS_COMPONENTS&PartFamilyID=10-09102014-119468&PartID=10-09102014-119468&SrchRsltType=4&SrcRsltId=4)
9. Електричний з'єднувач Ethernet.— [http://www.tracepartsonline.net/%28S%28xdqy0k3p0a40y4lsasfiwme%29%29/PartDetails.aspx?Class=WURTH\\_ELEKTRONIK&clsid=&ManID=FCI&PartFamilyID=10-21112012-118334&PartID=10-21112012-118334](http://www.tracepartsonline.net/%28S%28xdqy0k3p0a40y4lsasfiwme%29%29/PartDetails.aspx?Class=WURTH_ELEKTRONIK&clsid=&ManID=FCI&PartFamilyID=10-21112012-118334&PartID=10-21112012-118334).

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 22.11 2016 г.*

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТНЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕСУРСОВ INTERNET

*Представлена методика проектирования электронной аппаратуры на основе функционально-узлового метода, предусматривающего использование 2D- и 3D-моделей несущих конструкций фирм-производителей, как способ снижения времени разработки и трудоемкости разработки и повышения качества конструкторской документации на электронную аппаратуру.*

*Ключевые слова: проектирование электронной аппаратуры, несущие конструкции электронной аппаратуры, конструкторская документация, Internet.*

DOI: 10.15222/ТКЕА2016.6.11  
UDC 621.38.001.66(031)

A. P. KARLANGACH

Ukraine, Odessa national polytechnic university

E-mail: sasha7725@i.ua

## DESIGNING ELECTRONIC EQUIPMENT ON THE BASIS OF STANDARD MECHANICAL STRUCTURES USING INTERNET RESOURCES

*The author proposes a method to design electronic equipment based on functional-node design method that involves the use of 2D- and 3D- models mechanical structures for electronic equipment as a way to reduce development time and errors when creating design documentation for electronic equipment.*

*At present, most areas of science and technology are computerized, more problems in designing electronic equipment are dealt with using computer-aided design (CAD) and Computer-aided manufacturing (CAM) to reduce the time required for development and manufacturing of electronic equipment. Development of design documentation also requires a more effective approach, because the less the time for development of the design documentation is, the faster the developed device will go into production.*

*The aim of the study is to develop a method of designing electronic equipment using 2D and 3D models of standard mechanical structures for electronic equipment using Internet resources.*

*Based on the presented methods is an example of designing a device from standard bearing structures.*

*Compared with traditional technology, the method of designing electronic equipment using standard parts has the following advantages:*

- reduces time and improves quality of development through the use of existing design documentation;
- accelerates the implementation and introducing into production processes;
- increases unification of design solutions.

*Key words: design of electronic equipment, standard mechanical structure for electronic equipment, design documentation, Internet.*

### REFERENCES

1. <http://schroff.pentair.com/en/schroff-apac/Ratiopac-PRO>.
2. [https://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/products/solid-edge/](https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/solid-edge/).
3. [News of Schroff]. Elektronnye komponenty i sistemy, 2013, no 7, p. 57.
4. <http://www.traceparts.com/>.
5. [http://www.tracepartsonline.net/\(S\(ihi0u2thhrtamm3egpiu3q4e\)\)/PartDetails.aspx?PartFamilyID=30-24112016-097940&PartID=30-24112016-097940&SrchRsltType=4&SrchRsltId=2](http://www.tracepartsonline.net/(S(ihi0u2thhrtamm3egpiu3q4e))/PartDetails.aspx?PartFamilyID=30-24112016-097940&PartID=30-24112016-097940&SrchRsltType=4&SrchRsltId=2).
6. [http://www.tracepartsonline.net/\(S\(ihi0u2thhrtamm3egpiu3q4e\)\)/PartDetails.aspx?PartFamilyID=10-17122013-104970&PartID=10-17122013-104970&SrchRsltType=4&SrchRsltId=2](http://www.tracepartsonline.net/(S(ihi0u2thhrtamm3egpiu3q4e))/PartDetails.aspx?PartFamilyID=10-17122013-104970&PartID=10-17122013-104970&SrchRsltType=4&SrchRsltId=2).
7. [http://www.tracepartsonline.net/\(S\(r2qk5xbacnrey4lo0newwh2p\)\)/PartDetails.aspx?Class=RS\\_COMPONENTS&clsid=&ManID=ASSMANN&PartFamilyID=10-02092010-081515&PartID=10-02092010-081515&SrchRsltId=5&SrchRsltType=0](http://www.tracepartsonline.net/(S(r2qk5xbacnrey4lo0newwh2p))/PartDetails.aspx?Class=RS_COMPONENTS&clsid=&ManID=ASSMANN&PartFamilyID=10-02092010-081515&PartID=10-02092010-081515&SrchRsltId=5&SrchRsltType=0)
8. [http://www.tracepartsonline.net/\(S\(ihi0u2thhrtamm3egpiu3q4e\)\)/PartDetails.aspx?Class=RS\\_COMPONENTS&clsid=&ManID=RS\\_COMPONENTS&PartFamilyID=10-09102014-119468&PartID=10-09102014-119468&SrchRsltType=4&SrchRsltId=4](http://www.tracepartsonline.net/(S(ihi0u2thhrtamm3egpiu3q4e))/PartDetails.aspx?Class=RS_COMPONENTS&clsid=&ManID=RS_COMPONENTS&PartFamilyID=10-09102014-119468&PartID=10-09102014-119468&SrchRsltType=4&SrchRsltId=4)
9. [http://www.tracepartsonline.net/%28S%28xdqy0k3p0a40y4lsasfiwme%29%29/PartDetails.aspx?Class=WURTH\\_ELEKTRONIK&clsid=&ManID=FCI&PartFamilyID=10-21112012-118334&PartID=10-21112012-118334](http://www.tracepartsonline.net/%28S%28xdqy0k3p0a40y4lsasfiwme%29%29/PartDetails.aspx?Class=WURTH_ELEKTRONIK&clsid=&ManID=FCI&PartFamilyID=10-21112012-118334&PartID=10-21112012-118334).

Д. т. н. А. Ф. КАДАЦКИЙ, к. т. н. А. П. РУСУ

Украина, Одесская национальная академия связи им. О. С. Попова  
E-mail: shurusu@mail.ru

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДРОССЕЛЯХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

*Выполнен анализ энергетических и магнитных процессов, происходящих в магнитопроводах дросселей импульсных преобразователей электрической энергии постоянного и переменного тока, получена их обобщенная математическая модель. Приведены соотношения, связывающие величину преобразованной мощности с параметрами магнитопровода.*

*Ключевые слова: импульсный преобразователь, преобразователь переменного/постоянного напряжения, магнитопровод, магнитный поток/индукция, рекуперация.*

Преобразование параметров электрической энергии (ЭЭ) является актуальной задачей на протяжении десятков лет. Интеграция альтернативных источников электрической энергии, таких как гелио- и ветроэлектростанции, в промышленную сеть переменного тока, зарядка гибридных и электромобилей — вот некоторые примеры новых актуальных задач, для решения которых требуется преобразование параметров ЭЭ. Современные преобразователи ЭЭ изменяют уровни напряжения, частоту, род тока, число фаз с возможностью контроля и регулирования различных параметров как источника электрической энергии, так и потребителя (нагрузки).

В настоящее время приоритетным направлением при построении преобразователей ЭЭ является импульсный способ преобразования, обеспечивающий наилучшие технико-экономические показатели. Традиционно основной сферой применения импульсных преобразователей электрической энергии (ИПЭЭ) считается преобразование постоянного тока, однако в настоящее время импульсный способ преобразования ЭЭ активно используется в преобразователях рода тока (выпрямителях и инверторах), преобразователях частоты, компенсаторах реактивной мощности, активных фильтрах гармоник, усилителях звуковой частоты и т. д.

Относительно новым направлением использования импульсного метода преобразования является преобразование параметров ЭЭ переменного тока без традиционного для подобных устройств звена постоянного тока, принципы которого изложены в [1, 2]. Одним из первых импульсных преобразователей переменного напряжения является стабилизатор напряжения промышленной сети мощностью 9 кВА, разработанный компанией ГОФЕР Корпорейшн (Украина) [3].

Несмотря на ряд решенных вопросов в области импульсного преобразования ЭЭ, существуют факторы, сдерживающие использование ИПЭЭ на практике. Основным из них является отсутствие единой теоретической базы импульсного процесса преобразования. Традиционными математическими моделями импульсного процесса преобразования являются усредненные и переключаемые модели, классические примеры которых приведены в [2, 4–7]. Также импульсный процесс преобразования может быть описан математическими моделями других типов, например спектральными [8, 9] или матричными [10, 11].

Основным недостатком существующих математических моделей является отсутствие единого подхода к процессу преобразования. Так, в большинстве работ специфика конкретной схемы и режима ее работы отражается отдельной математической моделью. Отсутствует единый подход к преобразованию постоянного и переменного тока, недостаточно рассмотрены вопросы работы ИПЭЭ в режиме рекуперации. Все это приводит к увеличению числа математических моделей соответственно количеству схем ИПЭЭ и их режимов работы.

Попытки разработки обобщенных математических моделей ИПЭЭ предпринимаются практически с момента их создания. Так, например, в [12, 13] различные схемы ИПЭЭ объединены с помощью коэффициентов конфигурации. В [14, 15] приведена обобщенная математическая модель для квазиустановившегося и переходного режимов работы ИПЭЭ при безразрывном и разрывном токе дросселя. В [16–18] в рамках одной обобщенной модели рассмотрены наиболее популярные схемы ИПЭЭ постоянно-

го тока в режимах безразрывного и разрывного тока дросселя.

В [19, 20] выполнен анализ электрических и энергетических процессов в ИПЭЭ, а также принципы их построения, где показано, что ИПЭЭ постоянного и переменного тока, работающие в режимах передачи, рекуперации и холостого хода, могут быть рассмотрены в рамках одной обобщенной математической модели.

Однако при всем этом на сегодняшний день отсутствует обобщенная математическая модель энергетических и магнитных процессов, которая бы описывала импульсный процесс преобразования для наиболее распространенных типов схем ИПЭЭ, режимов работы и рода тока.

В настоящей работе проведен анализ энергетических и магнитных процессов в дросселях импульсных преобразователей электрической энергии ИПЭЭ и получена обобщенная математическая модель, описывающая наиболее распространенные типы ИПЭЭ, режимы работы (переда-

ча, рекуперация, холостой ход) и род тока (постоянный, переменный).

В [20] показано, что в традиционных широко используемых схемах ИПЭЭ (понижающем, повышающем, инвертирующем, обратноходовом) можно выделить импульсный регулятор (ИР) (рис. 1), у которого напряжения  $u_{вх}(t)$  и  $u_{вых}(t)$  между входными (1.1 и 1.2) и между выходными (2.1 и 2.2) клеммами зависят от топологии (схемы) преобразователя.

В частном случае при  $u_{вх}(t) = u_{п}(t)$  и  $u_{вых}(t) = u_{н}(t)$  (рис. 1, з) и использовании дросселя  $L1$  с двумя изолированными обмотками  $W1$  и  $W2$  реализуется ИПЭЭ, известный как обратноходовой преобразователь (Fly-Back Converter), обеспечивающий преобразование электрической энергии с гальванической развязкой входных и выходных цепей (рис. 2).

При подключении входа ИР между входом и выходом ИПЭЭ, а выхода ИР непосредственно к выходу ИПЭЭ (рис. 1, а), получается ИПЭЭ, известный в литературе как ИПЭЭ I рода или

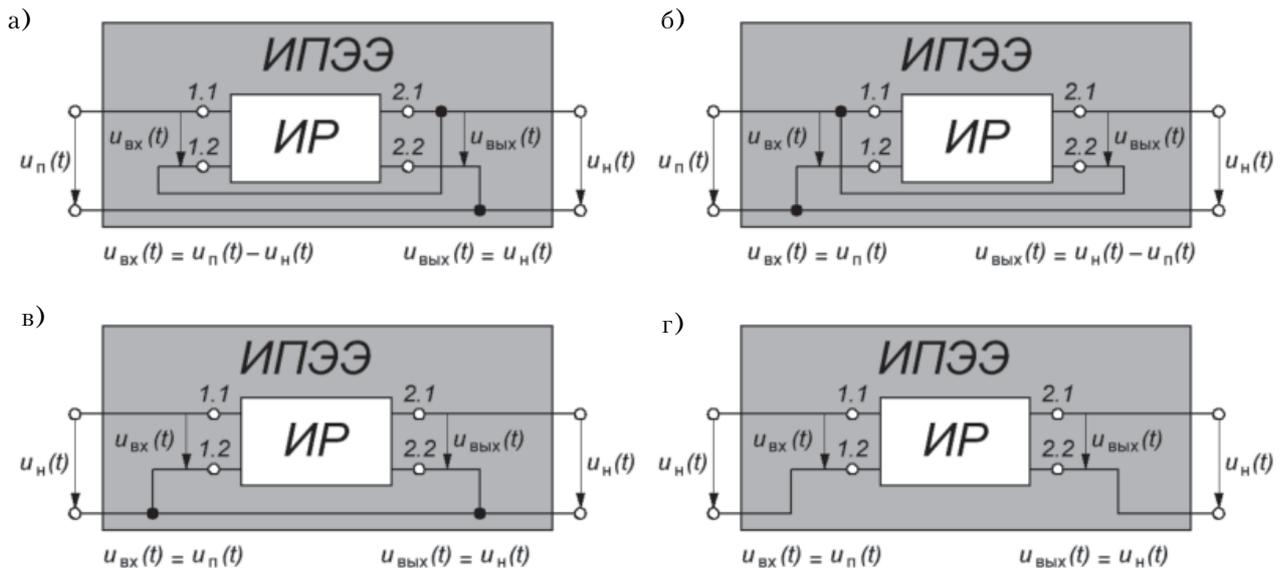


Рис. 1. Функциональные схемы ИПЭЭ понижающего (а), повышающего (б), инвертирующего (в) и обратноходового (г) типов

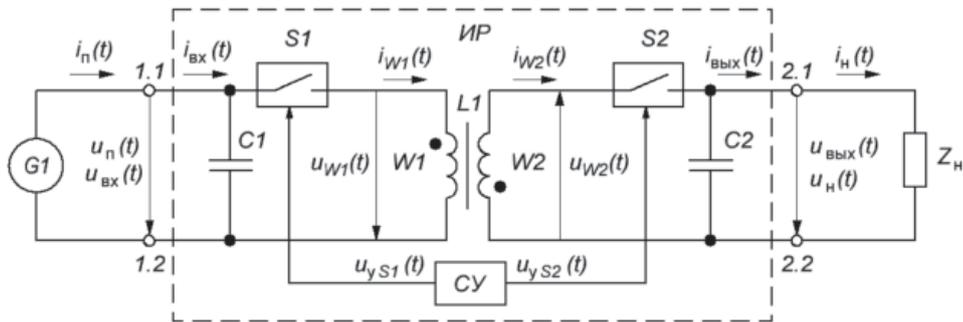


Рис. 2. Обратноходовой ИПЭЭ

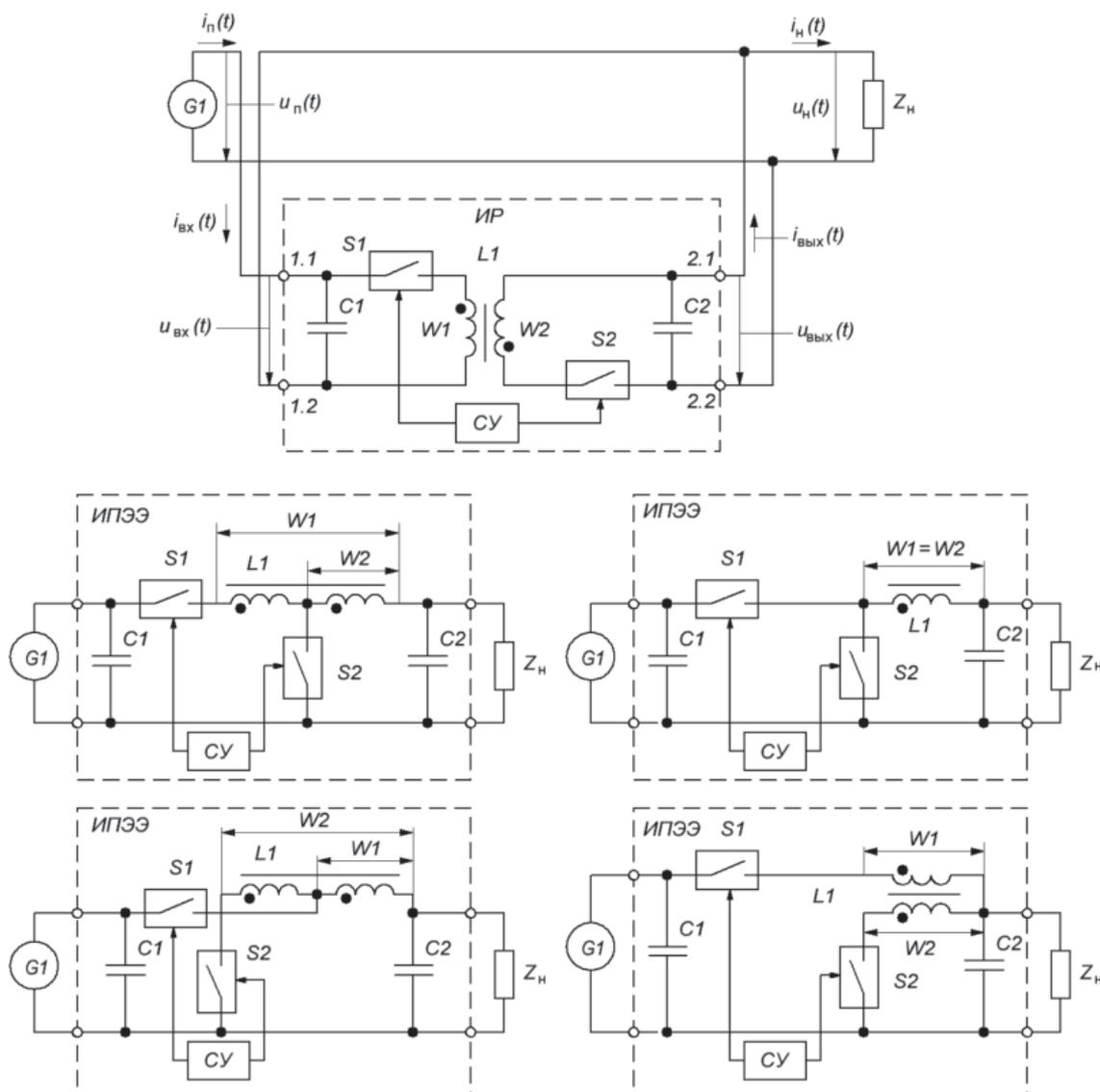


Рис. 3. ИПЭЭ понижающего типа

понижающий преобразователь (рис. 3). При подключении входа ИР непосредственно к входу ИПЭЭ, а выхода ИР между входом и выходом ИПЭЭ (рис. 1, б) получается ИПЭЭ II рода или повышающий преобразователь (рис. 4). При подключении входа ИР непосредственно к входу ИПЭЭ, а выхода ИР непосредственно к выходу ИПЭЭ и при наличии гальванической связи между входом и выходом (рис. 1, в), получается ИПЭЭ III рода или инвертирующий преобразователь (рис. 5).

Все ИПЭЭ с гальванической связью входа и выхода (рис. 3–5) в общем случае могут использовать бестрансформаторное (дроссель имеет одну обмотку), трансформаторное (дроссель имеет две отдельные обмотки) и автотрансформаторное (дроссель имеет одну обмотку, состоящую из двух полуобмоток) включение дросселя.

В [20] показано, что во всех традиционных типах преобразователей характер электрических

процессов в импульсных регуляторах одинаков. В частных случаях (при равенстве напряжений во входных и выходных цепях ИР в ИПЭЭ различных типов, при преобразовании равной мощности и идентичных параметрах элементов) электрические процессы в ИР в одноименных цепях и элементах будут идентичны.

В общем случае ИПЭЭ предназначен для преобразования напряжения источника ЭЭ  $G1$  постоянного или переменного тока до величин, требуемых для нормальной работы нагрузки  $Z_n$ , которая в общем случае может быть комплексной ( $Z_n = R_n + jX_n$ ) (рис. 2).

Диаграммы основных электрических процессов ИР при преобразовании ЭЭ [20] показаны на рис. 6. Одним из основных элементов ИР является накопительный дроссель  $L1$ , содержащий две обмотки  $W1$  и  $W2$  с числом витков, соответственно,  $W_1$  и  $W_2$ . Обмотка  $W1$  с помощью

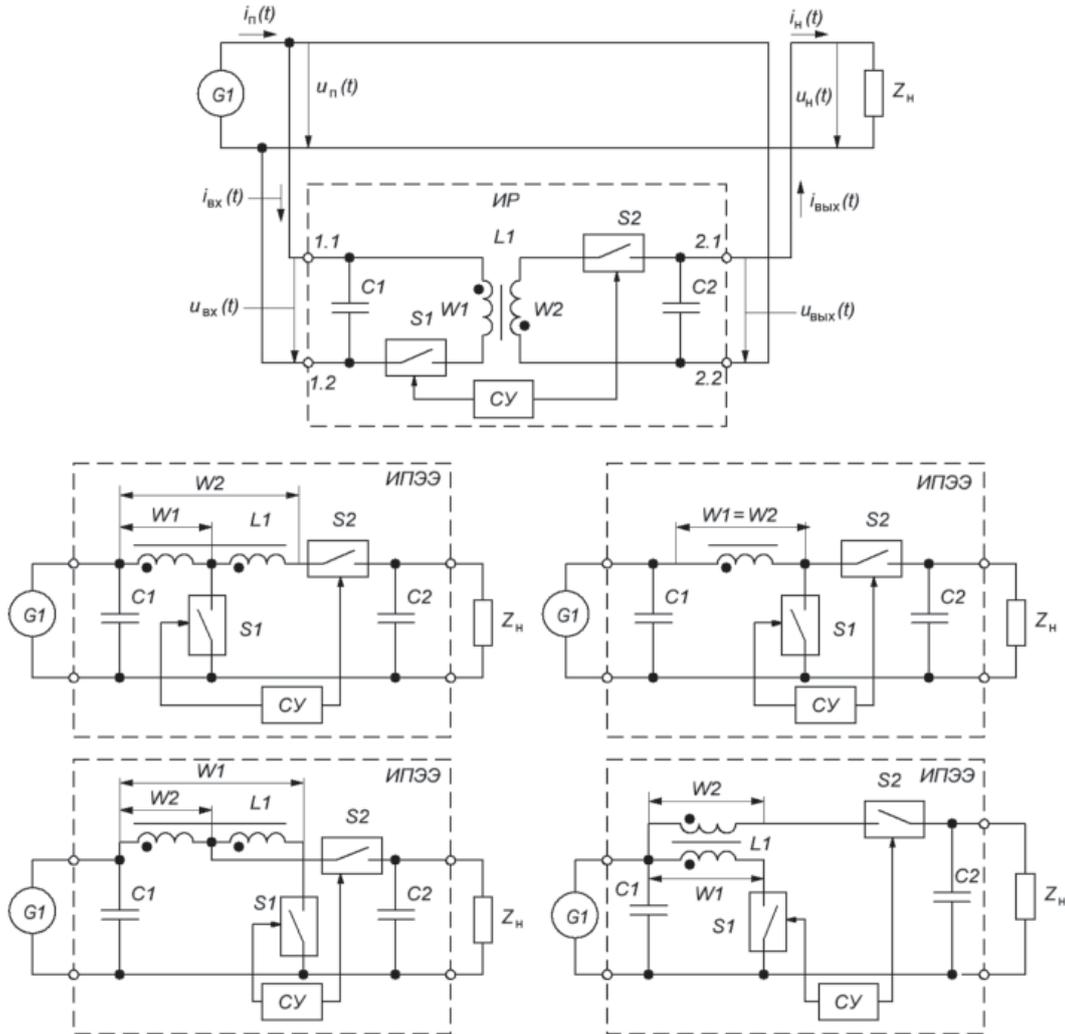


Рис. 4. ИПЭЭ повышающего типа

ключа  $S1$  периодически подключается к конденсатору  $C1$ . Обмотка  $W2$  с помощью ключа  $S2$  периодически подключается к конденсатору  $C2$ . Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  подключены, соответственно, к входным и выходным клеммам ИП и предназначены для уменьшения высокочастотных пульсаций входных ( $u_{вх}(t)$ ,  $i_{вх}(t)$ ) и выходных ( $u_{вых}(t)$ ,  $i_{вых}(t)$ ) напряжений и токов. Они выполняют функцию небольших аккумуляторов и способны к быстрому обмену электрической энергией с дросселем  $L1$  в процессе преобразования.

Ключи  $S1$  и  $S2$  в зависимости от сигналов управления, соответственно,  $u_{yS1}(t)$  и  $u_{yS2}(t)$  (рис. 6) в общем случае, способны находиться в замкнутом (проводящем) или в разомкнутом (непроводящем) состоянии и обеспечивать протекание или блокировку протекания тока в любом направлении.

Схема управления (СУ) формирует периодические сигналы управления  $u_{yS1}(t)$  и  $u_{yS2}(t)$ , соответственно, ключами  $S1$  и  $S2$  так, что в любой момент времени в проводящем состоянии всегда находится только один ключ ( $S1$  или  $S2$ ). Таким

образом, период преобразования длительностью  $T_n$  можно разделить на два интервала (рис. 6): первый интервал (интервал накопления) длительностью  $t_1$ , на протяжении которого в проводящем состоянии находится ключ  $S1$ ; второй интервал (интервал возврата) длительностью  $t_2$ , на протяжении которого в проводящем состоянии находится ключ  $S2$  ( $t_1 = t_{кон1} - t_{нач1}$ ,  $t_2 = t_{кон2} - t_{нач2}$ , где  $t_{нач1}$ ,  $t_{нач2}$  – время начала,  $t_{кон1}$ ,  $t_{кон2}$  – время конца, соответственно, интервалов накопления и возврата).

Особенностью ИП является преобразование ЭЭ порциями (импульсами), величина которых составляет

$$w_{ИП}(t) = p_{ИП}(t)T_n = p_{ИП}(t)/f_n, \quad (1)$$

где  $T_n$ ,  $f_n$  – соответственно, период и частота преобразования;

$p_{ИП}(t)$  – мгновенное значение выходной мощности ИП,  $p_{ИП}(t) = u_{вых}(t)i_{вых}(t)$ .

При совпадении знаков  $u_{вых}(t)$  и  $i_{вых}(t)$  мгновенное значение мощности положительно, и ЭЭ

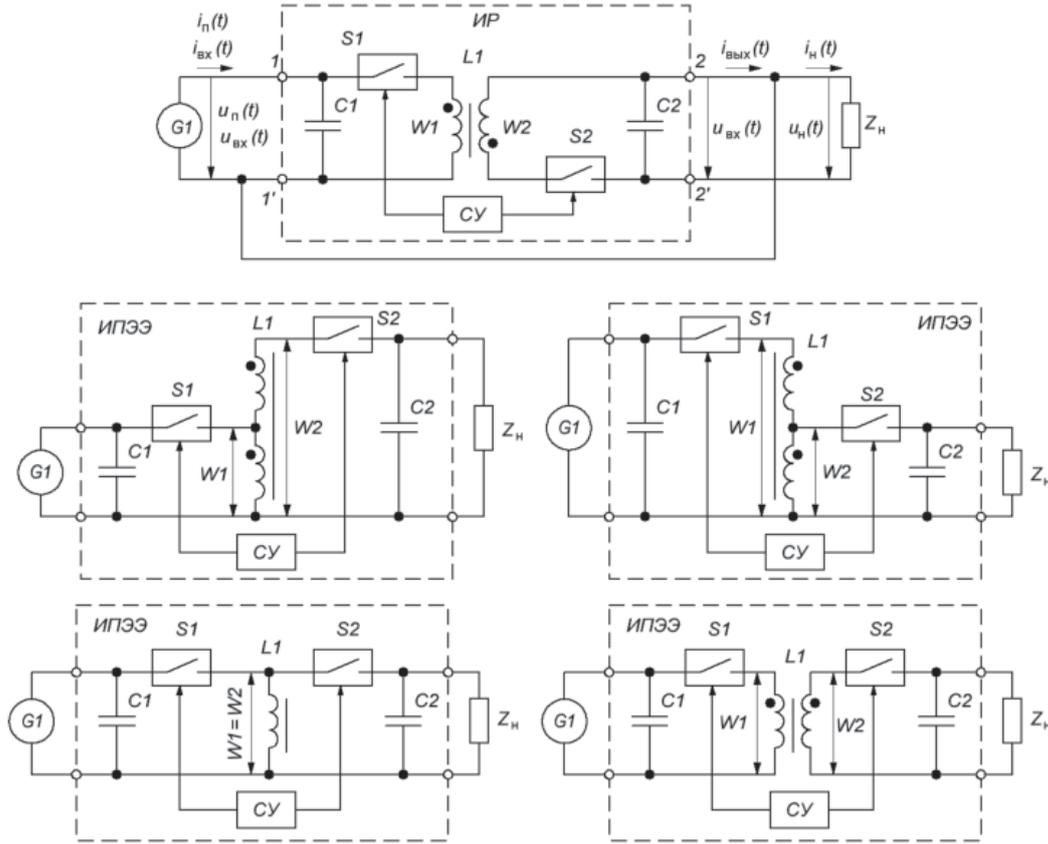


Рис. 5. ИПЭЭ инвертирующего типа

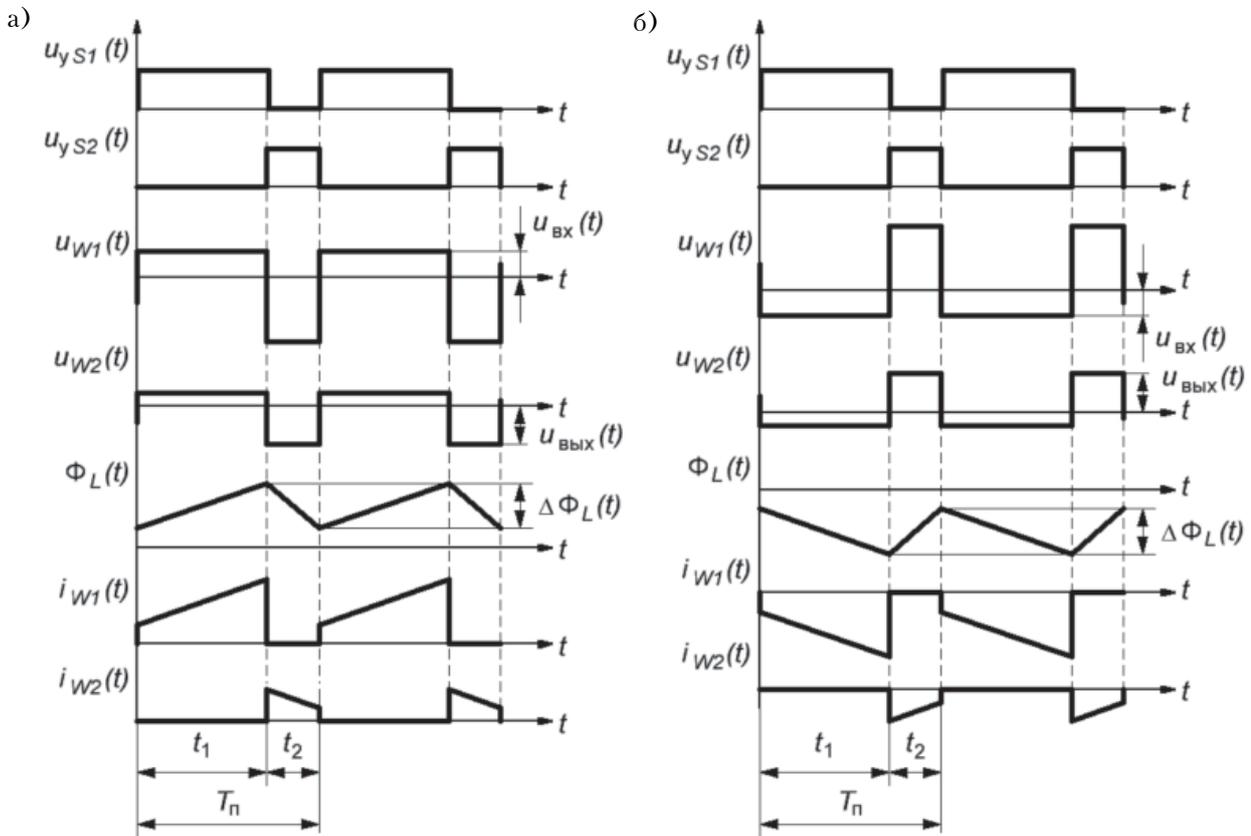


Рис. 6. Диаграммы электрических процессов в ИП при положительной (а) и отрицательной (б) полярности напряжения

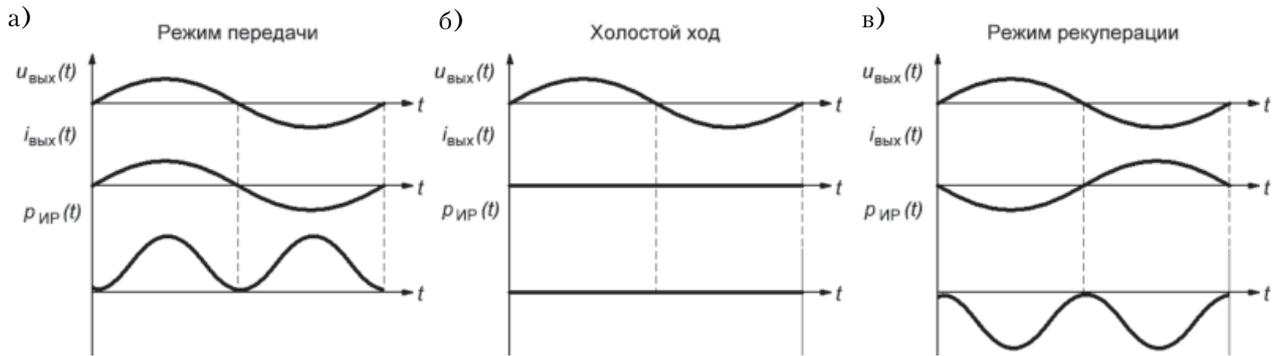


Рис. 7. Диаграммы выходных напряжения, тока и мощности ИПЭЭ в режимах передачи (а), холостого хода (б) и рекуперации (в)

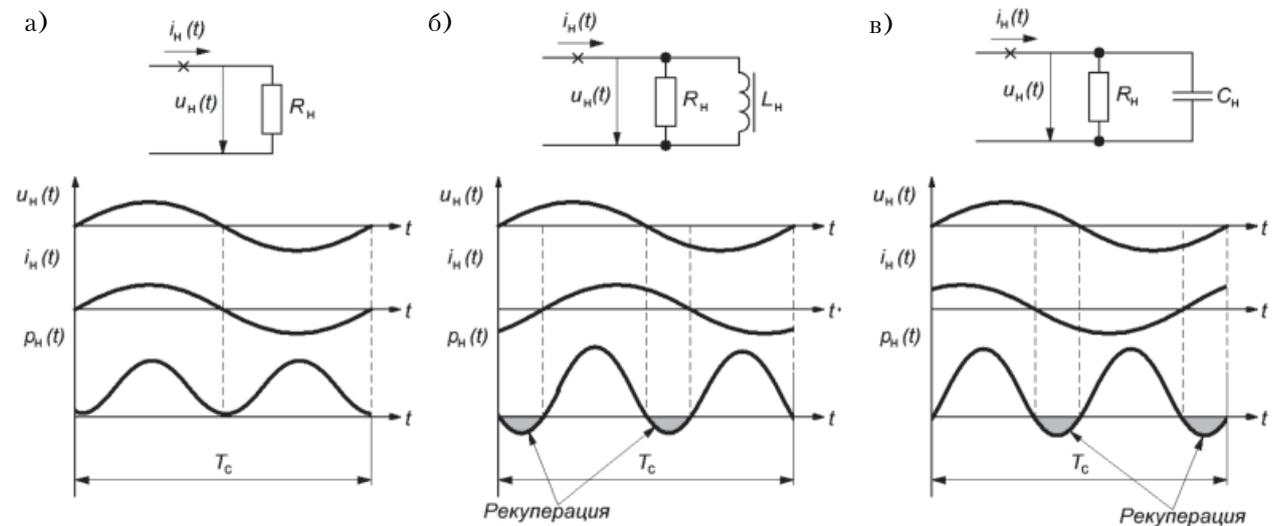


Рис. 8. Диаграммы напряжения, тока и мощности потребителя электрической энергии переменного тока при активном (а), активно-индуктивном (б) и активно-емкостном (в) характере нагрузки

передается от входа к выходу ИР (режим передачи, рис. 7, а). В случае несовпадения знаков  $u_{\text{вых}}(t)$  и  $i_{\text{вых}}(t)$  мгновенное значение мощности отрицательно, и ЭЭ передается от выхода к входу ИР (режим рекуперации, рис. 7, в). В случае когда мгновенное значение мощности нагрузки равно нулю, ЭЭ через ИР не передается (режим холостого хода, рис. 7, б).

ИПЭЭ постоянного тока, как правило, работают только в режиме передачи. Режим рекуперации для них нехарактерен, а режим холостого хода является аварийным (обычно ИПЭЭ постоянного тока имеют в своем составе некоторую «минимальную» нагрузку, обеспечивающую защиту силовой части и оборудования от выхода из строя при уменьшении тока нагрузки). ИПЭЭ переменного тока в большинстве случаев должны работать во всех трех указанных режимах, поскольку большинство потребителей электрической энергии переменного тока потребляют и активную, и реактивную мощность. В качестве примера на рис. 8 показаны диаграммы напряжения  $u_n(t)$ , тока  $i_n(t)$  и мощности  $p_n(t)$  наиболее распространенных на практике

видов нагрузки: активной, активно-индуктивной и активно-емкостной. Из графиков видно, что на протяжении периода  $T_c = 1/f_c$ , где  $f_c$  — частота источника G1, потребитель в общем случае может функционировать во всех режимах: передачи, холостого хода и рекуперации.

Для ИПЭЭ (рис. 2) выходные напряжения и токи ИР совпадают с соответствующими напряжениями и токами нагрузки ( $u_{\text{вых}}(t) = u_n(t)$ ,  $i_{\text{вых}}(t) = i_n(t)$ ), а мощность ИР равна мощности нагрузки ( $p_{\text{ИР}}(t) = p_n(t)$ ).

Конструктивно дроссель ИР L1 (рис. 2) состоит из магнитопровода и двух изолированных обмоток W1 и W2 (рис. 9, а). Магнитопроводы дросселей изготавливаются из ферромагнитных материалов. В большинстве случаев эквивалентная магнитная проницаемость магнитопровода  $\mu_{\text{экв}}$  отличается от магнитной проницаемости материала  $\mu$ , из которого он изготовлен, например, из-за наличия немагнитного зазора. Также в ИР часто используются материалы с распределенным зазором (например, из распыленного железа).

Количество энергии в магнитопроводе дросселя в общем случае определяется величиной

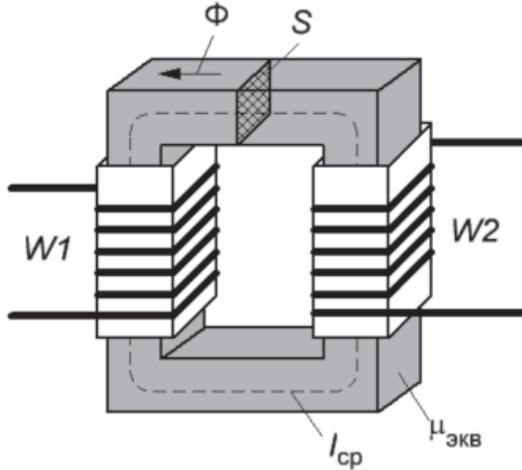


Рис. 9. Конструкция дросселя L1 (см. рис. 2)

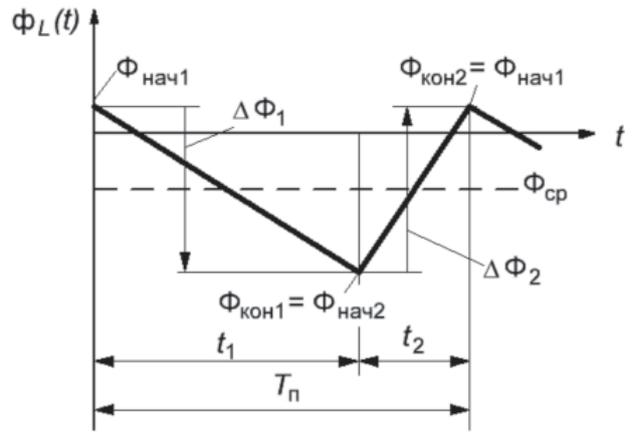


Рис. 10. Диаграмма магнитного потока дросселя L1

магнитной индукции  $b(t)$  и его геометрическими размерами [21]:

$$w(t)_L = \frac{V}{2\mu_{\text{эКВ}}\mu_0} b^2(t) = \frac{l_{\text{ср}}}{2\mu_{\text{эКВ}}\mu_0 S} \Phi^2(t), \quad (2)$$

где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума;  $V, l_{\text{ср}}, S$  — объем, средняя длина магнитной линии и площадь поперечного сечения магнитопровода соответственно ( $V = Sl_{\text{ср}}$ );  $\Phi(t)$  — магнитный поток в магнитопроводе.

Обобщим конструктивные параметры магнитопровода через параметр  $A_L = \mu_{\text{эКВ}}\mu_0 S/l_{\text{ср}}$ , который приводится большинством производителей для расчета индуктивности. В этом случае выражение (2) запишется в виде

$$w(t)_L = \frac{\Phi^2(t)}{2A_L}. \quad (3)$$

В соответствии с законом полного тока величина магнитного потока в магнитопроводе определяется суммой токов, которые протекают по всем обмоткам, связанным с магнитопроводом, и при 100%-й связи обмоток с магнитопроводом можем записать

$$\Phi(t) = \sum_{k=1}^{N_{\text{обм}}} \frac{\mu_{\text{эКВ}}\mu_0 S}{l_{\text{ср}}} i_k(t) W_k = A_L \sum_{k=1}^{N_{\text{обм}}} i_k(t) W_k, \quad (4)$$

где  $N_{\text{обм}}$  — число обмоток;  $i_k(t), W_k$  — ток и количество витков  $k$ -й обмотки соответственно.

Напряжение на выводах обмотки  $U_k$  определяется, согласно закону Фарадея, через эдс  $e_k$  в данной обмотке:

$$U_k = -e_k = W_k \frac{d\Phi}{dt}. \quad (5)$$

Выражения (3)–(5) позволяют установить связь магнитного потока с параметрами электрических и энергетических процессов ИР.

Рассмотрим произвольный период преобразования. В начале первого интервала в магни-

топроводе дросселя в общем случае может присутствовать некоторый магнитный поток  $\Phi_{\text{нач1}}$  отличный от нуля ( $\Phi_{\text{нач1}} \neq 0$ ) (рис. 10), соответствующий некоторому количеству ЭЭ  $W_{\text{нач1}}$ , которое определяется выражением (3).

На первом интервале преобразования к обмотке дросселя  $W1$  через открытый ключ  $S1$  прикладывается напряжение, под действием которого магнитный поток  $\Phi$  в дросселе изменяется на величину  $\Delta\Phi_1$ :

$$\Delta\Phi_1 = \frac{1}{W_1} \int_{t_{\text{нач1}}}^{t_{\text{кон1}}} u_{W1}(t) dt. \quad (6)$$

В [19] показано, что для ИР на протяжении как первого, так и второго интервалов преобразования изменением напряжения на обмотках дросселя можно пренебречь, и тогда выражение (6) можно представить как

$$\Delta\Phi_1 = \frac{U_{W1}}{W_1} t_1, \quad (7)$$

где  $U_{W1}$  — среднее напряжение на обмотке  $W1$  на интервале  $t_1$ .

К концу первого интервала преобразования магнитный поток в дросселе достигает значения  $\Phi_{\text{кон1}} = \Phi_{\text{нач1}} + \Delta\Phi_1$ , что приводит к изменению количества энергии в магнитопроводе на величину  $\Delta W_1$ :

$$\Delta W_1 = W_{\text{кон1}} - W_{\text{нач1}} = \frac{\Delta\Phi_1}{A_L} [\Phi_{\text{нач1}} + 0,5\Delta\Phi_1]. \quad (8)$$

Поскольку на данном интервале дроссель подключен только к конденсатору  $C1$ , то, пренебрегая потерями в элементах, изменение количества энергии в дросселе  $\Delta W1$  можно считать равным количеству энергии, потребленной из конденсатора  $C1$  (при  $\Delta W_1 > 0$ ) или возвращенной в конденсатор  $C1$  (при  $\Delta W_1 < 0$ ).

По окончании первого интервала преобразования производится переключение ключей  $S1$  и

S2 (ключ S1 переходит в закрытое, непроводящее состояние, а ключ S2 — в открытое, проводящее). В идеализированном случае время переключения ключей S1 и S2 равно нулю, а моменты времени  $t_{нач2}$  и  $t_{кон1}$  совпадают ( $t_{нач2} = t_{кон1}$ ). Соответственно, величина магнитного потока и количество энергии в магнитопроводе дросселя также количественно и качественно совпадают ( $\Phi_{нач2} = \Phi_{кон1}$ ,  $W_{нач2} = W_{кон1}$ ).

На втором интервале преобразования к обмотке дросселя W2 через открытый ключ S2 приложено напряжение  $u_{W2}(t)$ , под действием которого магнитный поток в дросселе изменяется на величину  $\Delta\Phi_2$ :

$$\Delta\Phi_2 = \frac{1}{W_2} \int_{t_{нач1}}^{t_{кон1}} u_{W2}(t) dt = \frac{U_{W2}}{W_2} t_2, \quad (9)$$

где  $U_{W2}$  — среднее напряжение на обмотке W2 на интервале  $t_2$ .

К концу второго интервала преобразования магнитный поток в дросселе достигает значения  $\Phi_{кон2} = \Phi_{нач2} + \Delta\Phi_2$ . Это приводит к изменению количества энергии в магнитопроводе на величину  $\Delta W_2$ :

$$\begin{aligned} \Delta W_2 &= W_{кон2} - W_{нач2} = \\ &= \frac{\Delta\Phi_2}{A_L} [\Phi_{нач2} + 0,5\Delta\Phi_2]. \end{aligned} \quad (10)$$

Поскольку на данном интервале дроссель подключен только к конденсатору C2, то, пренебрегая потерями в элементе, изменение количества энергии в магнитопроводе дросселя  $\Delta W_2$  будет равно количеству энергии, переданной (при  $\Delta W_2 < 0$ ) в конденсатор C2 или потребленной (при  $\Delta W_2 > 0$ ) из конденсатора C2.

По окончании второго интервала преобразования производится переключение ключей S2 и S1 (ключ S2 переходит в закрытое, непроводящее состояние, а ключ S1 — в открытое, проводящее) и начинается новый (следующий) период преобразования. При этом в идеализированном случае время переключения ключей S1 и S2 так же, как и ранее, равно нулю, время начала первого интервала следующего периода преобразования  $t_{нач1}$  след, начальное значение магнитного потока в дросселе  $\Phi_{нач1}$  след и количество энергии в дросселе  $W_{нач1}$  след совпадают с соответствующими значениями конца второго интервала преобразования текущего периода ( $t_{нач1}$  след =  $t_{кон2}$ ,  $\Phi_{нач1}$  след =  $\Phi_{кон2}$ ,  $W_{нач1}$  след =  $W_{кон2}$ ).

Общее приращение магнитного потока  $\Delta\Phi$  и количества энергии в дросселе  $\Delta W$  за период преобразования составит

$$\Delta\Phi = \Phi_{нач1 \text{ след}} - \Phi_{нач1} = \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2; \quad (11)$$

$$\Delta W = W_{нач1 \text{ след}} - W_{нач1} = \Delta W_1 + \Delta W_2. \quad (12)$$

В квазиустановившемся режиме электрические и энергетические процессы в смежных пе-

риодах преобразования идентичны. Из выражений (11), (12) видно, что идентичность процессов в смежных периодах преобразования ИР возможна при условии

$$\Delta\Phi_1 = -\Delta\Phi_2; \Delta W_1 = -\Delta W_2, \quad (13)$$

при котором  $\Delta\Phi = 0$  и  $\Delta W = 0$ .

Для ИПЭЭ постоянного тока смежные периоды преобразования строго идентичны, а для ИПЭЭ переменного тока строго идентичными являются периоды преобразования, отстоящие друг от друга на расстоянии  $T_c$ . Однако, как показано в [19], при принятых допущениях выражение (13) является справедливым для ИПЭЭ и постоянного, и переменного токов.

Таким образом, в квазиустановившемся режиме энергетический цикл преобразования выглядит следующим образом: на первом интервале преобразования дроссель L1 обменивается с конденсатором C1 некоторым количеством энергии  $W_{ИР} = \Delta W_1 = -\Delta W_2$ , которая на втором интервале преобразования передается в конденсатор C2 или потребляется из него (в зависимости от знака  $\Delta W_1$ ). Поскольку к конденсаторам C1 и C2 подключены, соответственно, источник электрической энергии G1 и нагрузка  $Z_n$ , работа ИР сводится фактически к перемещению электрической энергии между источником и потребителем порциями (импульсами) величиной  $W_{ИР}$ . Следовательно, при отсутствии потерь количество ЭЭ, проходящей через ИР за период преобразования, равно количеству ЭЭ, переданной в нагрузку (в режиме передачи) или потребленной из нее (в режиме рекуперации) за тот же период:

$$\Delta W_1 = -\Delta W_2 = W_{ИР} = P_{\text{вых}} T_{\text{п}}, \quad (14)$$

где  $P_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} I_{\text{вых}}$  — среднее значение выходной мощности ИР.

Подстановка этого выражения в формулы (8) и (10) с учетом соотношений (11) — (13) позволяет определить начальные значения магнитного потока дросселя в каждом интервале преобразования:

$$\Phi_{нач1} = \frac{A_L}{\Delta\Phi_1} W_{ИР} - 0,5\Delta\Phi_1; \quad (15)$$

$$\Phi_{нач2} = \frac{A_L}{\Delta\Phi_1} W_{ИР} + 0,5\Delta\Phi_1. \quad (16)$$

Эти выражения позволяют определить среднее значение (постоянную составляющую) магнитного потока

$$\Phi_{\text{cp}} = 0,5[\Phi_{нач1} + \Phi_{нач2}] = \frac{A_L}{\Delta\Phi_1} W_{ИР}, \quad (17)$$

после чего можно установить связь между параметрами магнитного потока в дросселе и ко-

личеством ЭЭ, преобразуемой ИР за один цикл преобразования:

$$W_{ИР} = \frac{\Delta\Phi_1\Phi_{ср}}{A_L} \quad (18)$$

Отсюда видно, что режим работы ИР (передача, рекуперация или холостой ход) определяется произведением переменной ( $\Delta\Phi_1$ ) и постоянной ( $\Phi_{ср}$ ) составляющих магнитного потока.

Поскольку в соответствии с выражением (7) значение  $\Delta\Phi_1$  отлично от нуля ( $\Delta\Phi_1 \neq 0$  при  $U_{W1} \neq 0$  и  $t_1 > 0$ ), режим холостого хода ( $W_{ИР} = 0$ ) возможен при условии  $\Phi_{ср} = 0$ . В режиме холостого хода в начале и в конце каждого интервала преобразования модуль магнитного потока в дросселе достигает значения  $0,5|\Delta\Phi_1|$ , при этом его знаки в начале и конце каждого интервала преобразования противоположны (рис. 11). В этом режиме происходит обмен энергией между дросселем  $L1$  и конденсаторами  $C1, C2$  порциями  $W_{xx}$ , величина которых в соответствии с (3) составляет

$$W_{xx} = \frac{\Delta\Phi_1^2}{8A_L} \quad (19)$$

При отсутствии потерь общее количество энергии в элементах  $L1, C1, C2$  не изменяется, энергия от источника питания  $G1$  не потребляется и в нагрузку  $Z_n$  не передается. Таким образом, конденсаторы  $C1$  и  $C2$  наряду с дросселем  $L1$  также являются необходимыми элементами силовой части ИР, без которых его работа в режиме холостого хода невозможна.

В случае когда знаки  $\Delta\Phi_1$  и  $\Phi_{ср}$  совпадают,  $W_{ИР} > 0$  и ИР работает в режиме передачи,

при несовпадении знаков  $\Delta\Phi_1$  и  $\Phi_{ср}$  ИР работает в режиме рекуперации, при котором  $W_{ИР} < 0$  (рис. 11).

Величина магнитного потока дросселя ограничена индукцией насыщения магнитопровода и для обеспечения стабильной и безопасной работы ИР должна находиться в диапазоне

$$-\Phi_{нас} < \phi(t) < \Phi_{нас}, \quad (20)$$

где  $\Phi_{нас} = SB_{нас}$  — магнитный поток, соответствующий индукции насыщения  $B_{нас}$ .

Это накладывает ограничения на величины переменной и постоянной составляющих магнитного потока, а именно:

$$|\Delta\Phi_1| \leq 2\Phi_{нас}; \quad (21)$$

$$-(\Phi_{нас} - 0,5|\Delta\Phi_1|) \leq \Phi_{ср} \leq \Phi_{нас} - 0,5|\Delta\Phi_1|. \quad (22)$$

Подставляя выражение (22) в (18), получим формулу оценки максимального значения  $W_{ИР}$  для конкретного магнитопровода и выбранного режима работы:

$$|W_{ИР}| \leq \frac{|\Delta\Phi_1\Phi_{нас}| - 0,5\Delta\Phi_1^2}{A_L} \quad (23)$$

В случае когда в соотношениях (22), (23) стоит знак равенства, ИР работает при максимальной мощности или в режиме передачи, или в режиме рекуперации (рис. 11). Невыполнение условия (23) приводит к насыщению магнитопровода и возможному выходу из строя элементов силовой части ИР.

Зависимость количества преобразуемой энергии ИР  $W_{ИР}$  от величины переменной составляющей магнитного потока  $\Delta\Phi_1$  дросселя показаны на рис. 12, где видно, что значение  $W_{ИР}$  максимально при  $|\Delta\Phi_1| = \Phi_{нас}$ . При такой вели-

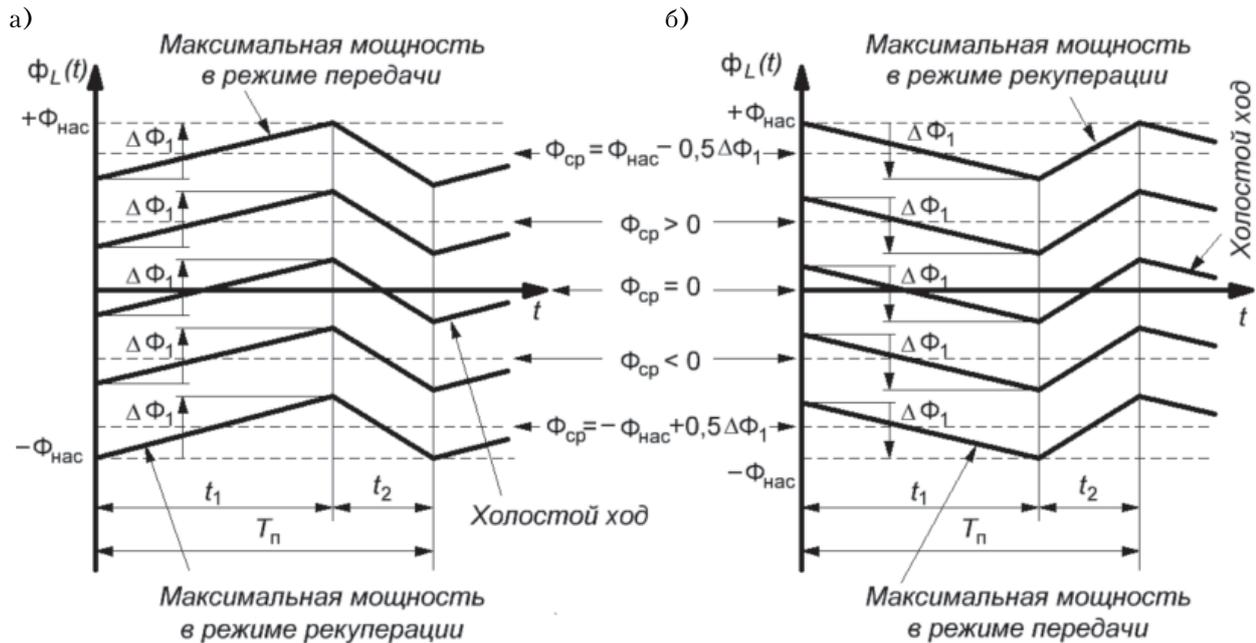


Рис. 11. Диаграммы магнитного потока и соответствующие им режимы работы ИР при  $\Delta\Phi_1 > 0$  (а) и  $\Delta\Phi_1 < 0$  (б)

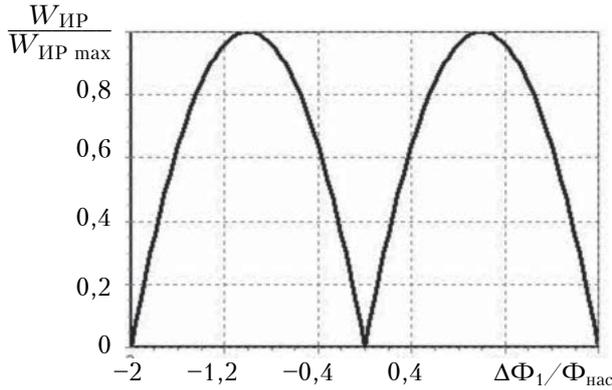


Рис. 12. Зависимость количества преобразуемой энергии  $W_{IP}$  от величины  $\Delta\Phi_1$

чине  $\Delta\Phi_1$  максимальное количество преобразуемой энергии соответствует случаю, когда модуль постоянной составляющей магнитного потока равен половине индукции насыщения магнитопровода  $|\Phi_{cp}| = 0,5\Phi_{нас}$  (рис. 13). Подставляя эти значения в (23), получим выражение, позволяющее оценить максимально возможное для данного магнитопровода количество преобразуемой энергии ИР:

$$|W_{IP}| \leq \frac{\Phi_{нас}^2}{2A_L}. \quad (24)$$

На практике максимальная величина индукции  $B_{max}$  и соответствующий ей магнитный поток  $\Phi_{max}$  в магнитопроводе дросселя выбираются меньше величин  $B_{нас}$  и  $\Phi_{нас}$ . Подставляя в формулу (24) вместо  $\Phi_{нас}$  реальную величину  $B_{max}$  с учетом (2), получим выражение, позволяющее

оценить максимальное количество преобразуемой энергии для конкретного магнитопровода:

$$|W_{IP}| \leq \frac{B_{max}^2}{2\mu_0\mu_{экр}} V, \quad (25)$$

где  $V = Sl_{cp}$  – объем магнитопровода.

Это выражение совпадает с известными формулами для расчета дросселей обратных ИПЭЭ [22] и является удобным для инженерных расчетов. Оно позволяет оценить энергетические возможности конкретного магнитопровода для ИР ИПЭЭ требуемой мощности, поскольку в соответствии с (1) мощность ИР пропорциональна количеству преобразованной энергии ( $p_{IP} = f_{п} W_{IP}$ ).

При необходимости выбора магнитопровода при заданных значениях мощности ИПЭЭ требуемый объем магнитного материала можно определить по формуле

$$V \geq \frac{2\mu_0\mu_{экр} |W_{IP\ max}|}{B_{max}^2}, \quad (26)$$

где  $W_{IP\ max}$  – максимальное количество электрической энергии, преобразуемой ИР.

Согласно [19] максимальное количество преобразуемой энергии определяется следующими выражениями:

– для ИПЭЭ постоянного тока

$$W_{IP\ max} = \frac{S_{IP}}{f_{п}}; \quad (27)$$

– для ИПЭЭ переменного тока

$$W_{IP\ max} = \frac{S_{IP}}{f_{п}} (1 + |\cos \phi|), \quad (28)$$

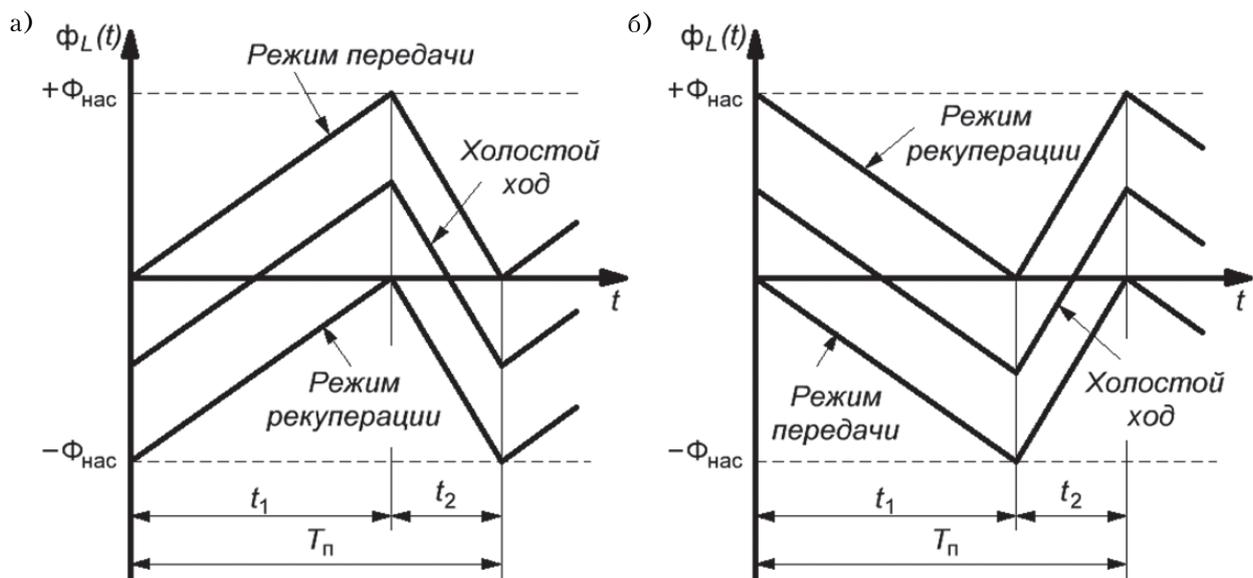


Рис. 13. Диаграммы магнитного потока при  $\Delta\Phi_1 = \Phi_{нас}$  (а) и  $\Delta\Phi_1 = -\Phi_{нас}$  (б)

где  $S_{ИР}$  — полная мощность ИР;  
 $\varphi$  — угол сдвига между напряжением и током нагрузки ИПЭЭ.

Анализ зависимостей  $S_{ИР}$  от полной мощности ИПЭЭ  $S_{ИПЭЭ}$ , выполненный в [19, 20], показывает, что величина мощности  $S_{ИР}$  зависит от способа включения входа и выхода ИР по отношению к входу и выходу ИПЭЭ (рис. 1) и от соотношения действующих значений напряжения питания и нагрузки ИПЭЭ:  $\bar{U}_н = U_н / U_п$ .

Для ИР ИПЭЭ понижающего типа (рис. 3)  $U_{вх} = U_п - U_н$ ,  $U_{вых} = U_н$ ,  $\bar{U}_н \leq 1$ , а мощность ИР связана с мощностью ИПЭЭ соотношением  $S_{ИР} = S_{ИПЭЭ} (1 - \bar{U}_н)$ . (29)

Для ИР ИПЭЭ повышающего типа (рис. 4)  $U_{вх} = U_н$ ,  $U_{вых} = U_н - U_п$ ,  $\bar{U}_н \geq 1$ , а мощность ИР связана с мощностью ИПЭЭ соотношением  $S_{ИР} = S_{ИПЭЭ} \left(1 - \frac{1}{\bar{U}_н}\right)$ . (30)

Для ИПЭЭ инвертирующего типа (рис. 5) и обратного преобразователя (рис. 2)  $U_{вх} = U_н$ ,  $U_{вых} = U_н$ , значение  $\bar{U}_н$  может быть

любым, а мощность ИР не зависит от него и равна мощности ИПЭЭ:

$$S_{ИР} = S_{ИПЭЭ}. \quad (31)$$

Учтя способы включения входа и выхода ИР с помощью коэффициентов топологии схемы, соответственно, входа  $F_1$  и выхода  $F_2$  [19, 20], получим обобщенную формулу, связывающую мощность ИР с мощностью нагрузки ИПЭЭ:

$$S_{ИР} = S_{ИПЭЭ} \left(1 - F_1 \bar{U}_н - \frac{F_2}{\bar{U}_н}\right). \quad (32)$$

Расчетные соотношения для определения требуемой максимальной мощности импульсного регулятора преобразователя  $W_{ИР max}$  (27) – (32) сведены в **таблицу** для удобства проведения инженерных расчетов (позволяет определить значение  $W_{ИР max}$  в зависимости от схемы преобразователя, действующих значений напряжения питания, напряжения нагрузки и частоты преобразования).

Зависимости относительного объема магнитопровода дросселя  $\bar{V} = V / V_{DC}$  от  $\bar{U}_н$  для различных типов ИПЭЭ постоянного и переменного тока при различных углах сдвига фаз между напряжением и током нагрузки показаны на

Соотношения для определения  $W_{ИР max}$  ИПЭЭ различных типов

Тип ИПЭЭ	$F_1$	$F_2$	$\bar{U}_н$	$S_{ИР}$	$W_{ИР max}$	
					для ИПЭЭ постоянного тока	для ИПЭЭ переменного тока
Понижающий (I рода)	1	0	$\frac{U_н}{U_п - U_н}$	$S_н (1 - \bar{U}_н)$	$\frac{S_{ИР}}{f_н}$	$\frac{S_{ИР} (1 +  \cos \varphi )}{f_н}$
Повышающий (II рода)	0	1	$\frac{U_н - U_п}{U_п}$	$S_н \left(1 - \frac{1}{\bar{U}_н}\right)$		
Инвертирующий (III рода)	0	0	$U_н / U_п$	$S_н$		
Обобщенные формулы			$\frac{U_н - F_2 U_п}{F_1 U_п - U_н}$	$S_н \left(1 - F_1 \bar{U}_н - \frac{F_2}{\bar{U}_н}\right)$		

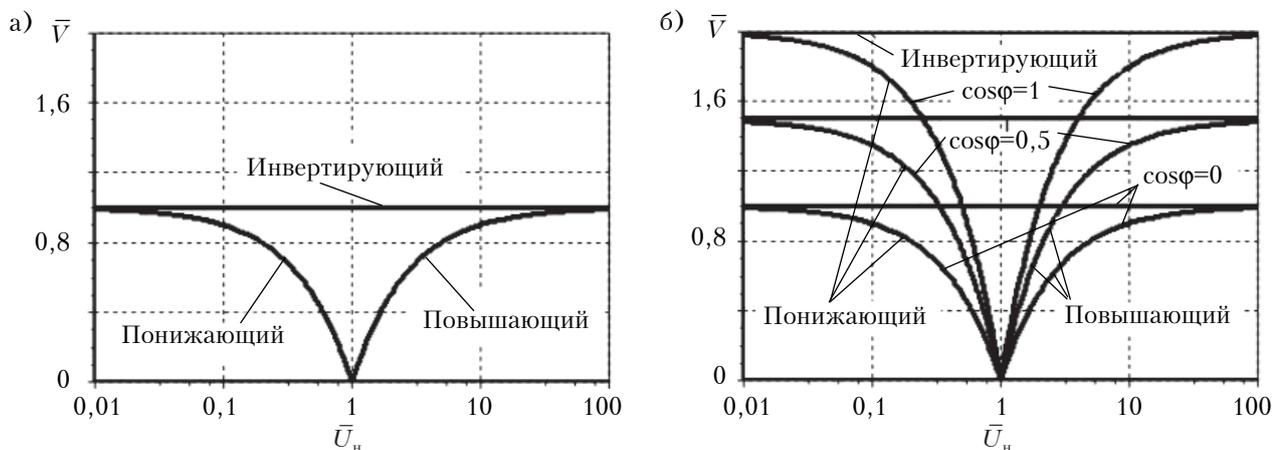


Рис. 14. Зависимости относительного объема магнитопровода дросселя для ИПЭЭ постоянного (а) и переменного (б) тока различных типов

**рис. 14.** В качестве нормирующего значения был выбран объем дросселя  $V_{DC}$  ИПЭЭ постоянно-го тока, реализованного по схеме рис. 2 при той же мощности нагрузки  $S_n$ .

Из рис. 14 видно, что для ИПЭЭ переменного тока, работающего на активную нагрузку ( $\varphi = 0$ ), объем магнитопровода дросселя должен быть в 2 раза больше по сравнению с аналогичным ИПЭЭ постоянного тока. Это связано с тем, что максимальное значение мгновенной мощности ИПЭЭ переменного тока, работающего в таком режиме, в 2 раза превышает его номинальную мощность [19]. При появлении сдвига фазы между напряжением и током нагрузки ( $\varphi \neq 0$ ) требуемый объем дросселя уменьшается.

Из графиков также видно, что путем выбора схемы ИПЭЭ и соответствующего включения ИР можно уменьшить величину преобразуемой мощности ИР и, соответственно, требуемый объем магнитопровода дросселя. Так, например, для ИПЭЭ как постоянного, так и переменного тока понижающего типа, работающего в диапазоне  $\bar{U}_n \geq 0,5$ , или для повышающего ИПЭЭ, работающего в диапазоне  $\bar{U}_n \leq 2$ , при таком подходе требуемый объем магнитопровода дросселя в 2 раза меньше, чем для ИПЭЭ, схема которого представлена на рис. 2.

### Выводы

Таким образом, анализ процессов, происходящих при импульсном преобразовании постоянного и переменного тока для всех рассмотренных схем преобразователей во всех режимах работы (передача, рекуперация, холостой ход), показал, что все они могут быть рассмотрены с единых позиций, при этом в качестве отправной точки необходимо рассматривать параметры магнитного потока в дросселе. Обобщенная математическая модель, полученная на основании результатов этого анализа, позволяет описать наиболее распространенные типы ИПЭЭ постоянного и переменного тока при работе в указанных режимах. При использовании современной элементной базы модель, несмотря на ее идеализированность, обеспечивает хорошую точность результатов. В случае же использования, например, силовых ключей, падение напряжения на которых соизмеримо с величинами напряжений питания и нагрузки, либо при использовании магнитопроводов дросселей с большой величиной удельных потерь на перемagnичивание точность модели ухудшается.

Разработанная модель может применяться при разработке и исследовании большого ряда устройств, использующих импульсный способ преобразования электрической энергии, например, таких как преобразователи постоянного/переменного напряжения, преобразователи рода тока (выпрямители, инверторы, преобразователи частоты), корректоры коэффициента мощности, усилители звуковой частоты (класса D, T).

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кобзев А.В., Лебедев Ю.М., Михайличенко Г.Я. и др. Стабилизаторы переменного напряжения с высокока-

стотным широтно-импульсным регулированием. — Москва: Энергоатомиздат, 1986.

2. Зиновьев Г.С. Силовая электроника. — Москва: Юрайт, 2012.

3. Стабилизатор импульсный с функцией выбора напряжения GF-9000 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gofer.ua/product/stabilizator/>

4. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. — Москва: Техносфера, 2005.

5. Bacha S., Munteanu I., Bratcu A.I. Power electronic converters modeling and control with case studies. — London: Springer-Verlag, 2014.

6. Jeong D.-K., Ryu M.-H., Kim H.-G., Kim H.-J. Optimized design of bi-directional dual active bridge converter for low-voltage battery charger // Journal of Power Electronics. — 2014. — Vol. 14, N 3. — P. 468–477.

7. Qin H., Kimball J. W. AC-AC dual active bridge converter for solid state transformer // Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Exposition (ECCE 2009). — 2009. — P. 3039–3044. <http://dx.doi.org/10.1109/TPE.2012.2204710>

8. Кадацкий А.Ф. Гармонический анализ электрических процессов в многофазных импульсных преобразователях постоянного напряжения с ШИМ-методом регулирования // Электричество. — 1997. — № 3. — С. 35–41.

9. Чапльгин Е.Е., Нгуен Хоанг Ан. Спектральные модели импульсных преобразователей с переменной частотой коммутации // Электричество. — 2006. — № 4. — С. 39–46.

10. Андриянов А.И., Малаханов А.А. Математическое моделирование динамики импульсного преобразователя напряжения повышающего типа // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2006. — № 1. — С. 61–69.

11. Коршунов А. Методика построения непрерывных моделей импульсных преобразователей постоянного напряжения // Компоненты и технологии. — 2006. — № 8.

12. Смольников Л.Е. Транзисторные преобразователи напряжения / Под ред. А.А. Голикова. — Москва: МЭИ, 1983.

13. Смольников Л.Е., Смольников В.Л. Влияние коэффициентов конфигурации и неидеальности элементов на регулировочную характеристику широтно-импульсных преобразователей постоянного напряжения // Системы и устройства электропитания радиоэлектронной аппаратуры. — 1994. — Вып. 4. — С. 29–42.

14. Капустин И.В. Разработка универсальной модели повышающего преобразователя, описывающей все режимы работы // Практическая силовая электроника. — 2012. — № 3. — С. 30–34.

15. Капустин И.В., Катаев Р.А., Блинов Р.В. Разработка обобщенной математической модели понижающего преобразователя напряжения для режимов прерывистого и непрерывного тока // Практическая силовая электроника. — 2013. — №3. — С. 20–28.

16. Кадацкий А.Ф., Русу А.П. Анализ электрических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения с широтно-импульсным регулированием // Электричество. — 2005. — № 9. — С. 43–54.

17. Кадацкий А.Ф., Русу А.П. Математическая модель электрических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения с широтно-импульсным методом регулирования // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. — 2004. — №3. — С. 10–16.

18. Кадацкий А.Ф., Русу А.П. Действующие значения токов элементов силовых каналов импульсных преобразователей постоянного напряжения с широтно-импульсным методом регулирования // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. — 2005. — № 1. — С. 11–17.

19. Кадацкий А.Ф., Русу А.П. Анализ энергетических процессов в импульсных преобразователях электрической энергии переменного тока // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2015. — № 1. — С. 22–32. — <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.1.22>

20. Кадацкий А.Ф., Русу А.П. Анализ принципов построения и режимов работы импульсных преобразователей электрической энергии // Практическая силовая электроника. — 2016. — № 2. — С. 10–24

21. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. — Москва: Высшая школа, 1991.

22. Хныков А.В. Теория и расчет трансформаторов источников вторичного электропитания / Москва: СОЛОН-Пресс, 2004.

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 08.11 2016 г.*

## АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА МАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ДРОСЕЛЯХ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Виконано аналіз енергетичних та магнітних процесів у магнітопроводах імпульсних перетворювачів електричної енергії постійного та змінного струму, отримано їх математичну модель. Наведено співвідношення, що зв'язують величину перетворюваної потужності із параметрами магнітопроводу.

Ключові слова: математична модель, імпульсний перетворювач, перетворювач постійної/змінної напруги, магнітопровід, магнітний потік/індукція, рекуперація.

DOI: 10.15222/TKEA2016.6.17  
UDC 621.314

A. F. KADATSKY, A. P. RUSU

Ukraine, Odessa National Academy of Telecommunications  
named after O. S. Popov  
E-mail: shurusu@mail.ru

## THE ANALYSIS OF ENERGY AND MAGNETIC PROCESSES IN INDUCTORS SWITCHED-MODE ELECTRICAL ENERGY CONVERTERS

The article presents the analysis of energy and magnetic processes in core of inductors switched-mode AC-AC and DC-DC converters. The mathematical model of energy and magnetic processes in core of inductors is obtained. The mathematical model is generalized to DC-DC and AC-AC converters, to most popular schemes of converters and to transfer, recuperation and idle modes. It is shown that the energy and magnetic processes in core of inductors are identical for DC-DC and AC-AC converters, for buck, boost, buck-boost and fly-back converters, and for transfer, recuperation and idle modes.

It is shown that energy processes in converters can be defined by parameters of magnetic flux of inductor core. It is shown that power of converter will be maximal, when value of ripple induction in core is equal the maximum allowable induction of core, and average value of induction in core is equal half of the maximum allowable induction of core. It is shown that maximum power of converter is proportional volume of inductor core.

Keywords: pulse converter, AC/DC converter, magnetic circuit, magnetic flux/induction, recuperation.

### REFERENCES

1. Kobzev A.V., Lebedev Yu.M., Mikhailichenko G.Ya. et al. *Stabilizatory peremennogo napryazheniya s vysokochastotnym shirotno-impul'snym regulirovaniem*. [AC voltage stabilizers with high-frequency pulse-width regulation]. Moscow, Energoatomizdat, 1986, 152 p. (Rus)
2. Zinov'ev G.S. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. Moscow, Yurayt, 2012, 667 p. (Rus)
3. Switching regulator GF-9000. <http://gofer.ua/product/stabilizator/>
4. Meleshin V.I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Transistor converter equipment]. Moscow, Tehnosfera, 2005, 632 p. (Rus)
5. Seddik Bacha, Iulian Munteanu, Antoneta Iuliana Bratcu. *Power electronic converters modeling and control with case studies*. London, Springer-Verlag, 2014, 454 p.
6. Dong-Keun Jeong, Myung-Hyo Ryu, Heung-Geun Kim, Hee-Je Kim. Optimized design of bi-directional dual active bridge converter for low-voltage battery charger. *Journal of Power Electronics*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 468-477.
7. Qin H., Kimball J. W. AC-AC dual active bridge converter for solid state transformer. *Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Exposition*, 2009, pp. 3039-3044. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2012.2204710>
8. Kadatsky A.F. [Harmonic analysis of electrical processes in multiphase switch-mode DC-DC converter with PWM regulation method]. *Elektrichestvo*, 1997, no. 3, pp. 35-41. (Rus)
9. Chaplygin E.E., Nguen KHoang An. [Spectral Model of a switched-mode converter with variable frequency]. *Elektrichestvo*, 2006, no. 4, pp. 39-46. (Rus)
10. Andriyanov A.I., Malakhanov A.A. [Mathematical modeling of dynamics switched-mode converter voltage boost type]. *The Bryansk State University Herald*, 2006, no. 1(9), pp. 61-69. (Rus)
11. Korshunov A. [The method for constructing continuous models of switched-mode DC-DC converters]. *Components & Technologies*, 2006, no. 8. (Rus)
12. Smol'nikov L.E. *Tranzistornye preobrazovately napryazheniya* [The transistor converters of voltage]. Moscow, MEI, 1983, 632 p. (Rus)
13. Smol'nikov L.E., Smol'nikov V.L. [Influence factors and imperfection configuration elements on the control characteristics of PWM switched-mode DC-DC converters]. *Sistemy i ustroystva elektropitaniya radioelektronnoi apparatury*, 1994, iss. 4, pp. 29-42. (Rus)
14. Kapustin I.V. [The development of an universal model of the boost converter, which describes all operating modes]. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2012, no. 3(47), pp. 30-34. (Rus)
15. Kapustin I.V., Kataev R.A., Blinov R.V. [The development of a generalized mathematical model buck converter for the discontinuous and continuous modes]. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2013, no. 3(51), pp. 20-28. (Rus)
16. Kadatsky A.F., Rusu A.P. [The analysis of electrical processes in pulse converters of constant voltage with a pulse-width method of regulation]. *Elektrichestvo*, 2005, no. 9, pp. 43-54. (Rus)
17. Kadatsky A.F., Rusu A.P. [Mathematical model of electrical processes in pulse converters of constant voltage with a pulse-width method of regulation]. *Proceedings of the O.S. Popov ONAT*, 2004, no. 3, pp. 10-16. (Rus)
18. Kadatsky A.F., Rusu A.P. [Effective values currents of elements powered channels of pulse converters constant voltage with a pulse-width method of regulation]. *Proceedings of the O.S. Popov ONAT*, 2005, no. 1, pp. 11-17. (Rus)
19. Kadatsky A.F., Rusu A.P. [The analysis of energy processes in switched-mode AC-AC converters]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2015, no. 1, pp. 22-32. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.1.22>
20. Kadatsky A.F., Rusu A.P. [Analysis of construction principles and operation switched-mode power converters]. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2016, no. 2(62), pp. 10-24. (Rus)
21. Irodov I.E. *Osnovnyye zakony elektromagnetizma* [The basic laws of electromagnetism]. Moscow, Vysshaya shkola, 1991, 289 p.
22. Khnykov A.V. *Teoriya i raschet transformatorov istochnikov vtorichnogo elektropitaniya* [Theory and design of transformer secondary power sources]. Moscow, SOLON-Press, 2004, 128 p.

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

Украина, Одесский национальный политехнический университет  
E-mail: vovic@ukr.net

## CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАТОРА ДЛЯ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРОВ В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

*Проведено CFD-моделирование радиатора с компактной теплоотдающей поверхностью в виде тупиковых полостей, в которые втекают импульсные воздушные струи. Получены тепло-аэродинамические характеристики и даны рекомендации по конструированию радиаторов такого типа для отвода тепла от микропроцессоров в ограниченном пространстве.*

*Ключевые слова:* CFD-моделирование, радиатор, тепловое сопротивление, импульсные струи, микропроцессоры.

Одним из завершающих и обязательных этапов проектирования и разработки таких изделий электронной техники, как микропроцессоры, является термотренировка, в процессе которой определяется поведение функциональных свойств микропроцессора при изменении его температуры, в частности температуры корпуса [1]. Термотренировка проводится на специальном стенде, основным элементом которого является многослойная коммутационная печатная плата с установленными на ней сокетом (одним или несколькими) с микропроцессорами (МП), чипсетами, интерфейсами, джамперами и другими электронными и неэлектронными компонентами, обеспечивающими разнообразные режимы функционирования МП в соответствии с техническим заданием на их разработку. Здесь размещаются и многочисленные датчики приборов (или сами приборы) для измерения всевозможных электрических параметров в контрольных точках коммутационной платы в соответствии с электрической принципиальной схемой.

Изменение температуры корпуса микропроцессора осуществляется, как правило, при помощи термоэлектрического модуля, габаритные размеры которого не превышают размеров МП. Условно холодная поверхность модуля с регулируемой температурой находится в прямом тепловом контакте с пьедесталом корпуса МП, предназначенного для установки кулера. На «горячую» поверхность термоэлектрического модуля устанавливается радиатор (теплообменник), отводящий в окружающую среду суммарный тепловой поток от МП и от самого модуля [2].

В зависимости от типа, производительности и режима работы МП используется жидкостное или воздушное охлаждение радиатора. Реализация способа охлаждения существенно зависит от размеров свободного пространства на

коммутационной плате стенда в зоне размещения сокета с микропроцессором. Высокая плотность компоновки платы, требование свободного доступа к джамперам и интерфейсам, а также наличие многочисленных датчиков и измерительных приборов ограничивает это пространство габаритными размерами сокета с элементами крепления в плане не более 50×50 мм и требует применения чрезвычайно компактного радиатора.

Требование компактности становится особенно актуальным в случае воздушного охлаждения. В известных решениях воздушного охлаждения микропроцессоров, исследованных, например, в [3–5], имеется радиатор с оребрением в виде пластин различной формы и осевой вентилятор, который, работая на нагнетание, направляет воздушный поток в межреберное пространство радиатора. Для повышения эффективности теплоотвода радиатор может дополняться тепловой трубой [5]. Такие и аналогичные им радиаторы прекрасно справляются с задачей обеспечения нормального теплового режима МП, однако из-за габаритных размеров они не могут быть использованы в ограниченном пространстве, характерном для термотренировочного стенда. В этом случае одним из решений может быть уменьшение площади теплоотдающей поверхности радиатора за счет резкого роста ее коэффициента теплоотдачи без увеличения объема охлаждающего воздуха.

Как показано в [6, 7], при неизменном расходе воздуха обеспечить резкий рост коэффициента теплоотдачи поверхности позволяет выполнение в ней одной или нескольких тупиковых полостей, в которые втекают импульсные (ударные) воздушные струи. В настоящей работе для оценки тепло-аэродинамических характеристик такого решения применительно к

охлаждению микропроцессоров было проведено CFD-моделирование импактно-струйного радиатора с тупиковыми полостями, форма и геометрические параметры которого допускают его размещение в ограниченном пространстве стенда для термотренировки микропроцессора.

**Расчетная область**

На рис. 1 схематично показан объект исследования (его симметричная половина), который представляет собой металлический радиатор, имеющий форму параллелепипеда, и немагнитный соплодержатель.

В верхнем (условно) основании радиатора выполнено пять тупиковых полостей цилиндрической формы — одна в геометрическом центре и четыре по углам. Соосно с тупиковыми полостями располагаются пять цилиндрических сопел, срезы которых утоплены вглубь полостей. К нижнему (условно) основанию радиатора подводится тепловой поток от термоэлектрического модуля и микропроцессора. Соплодержатель с входными отверстиями сопел является также и основанием распределительной камеры (на рис. 1 не показана), в которую по гибкому шлангу подается воздух от компрессора, расположенного за пределами стенда для термотренировки.

Воздух, поступаая в сопло, образует осесимметричную струю, которая ударяется в основание тупиковой полости и, растекаясь по ее основанию, разворачивается на 180° и вдоль боковой поверхности полости выходит из нее, а затем и из самого радиатора через зазор между радиато-

ром и соплодержателем. Возникающий в тупиковой полости удар и разворот струи приводит к заметному возрастанию интенсивности теплоотдачи по сравнению с традиционными ребристыми радиаторами, что позволяет достичь требуемого теплового сопротивления при резком уменьшении площади теплоотдающей поверхности.

На рис. 2 показана 3D-модель расчетной области радиатора для CFD-моделирования: твердотельный объем собственно радиатора с тупиковыми полостями, твердотельный объем соплодержателя с соплами и проточный объем, т. е. объем воздуха, заполняющий тупиковые полости, сопла, зазор между радиатором и соплодержателем в границах расчетной области. Моделирование проводилось с целью установления зависимости теплового сопротивления радиатора от скорости истечения воздуха из сопел, от диаметра сопел, глубины погружения среза сопла в тупиковую полость, а также определения его аэродинамической характеристики, т. е. зависимости потери напора воздуха  $\Delta H$  от скорости струи  $V$ .

Моделирование проводилось для следующих значений параметров расчетной области (см. рис. 1):

- размеры радиатора  $A \times B \times C = 40 \times 15 \times 20$  мм;
- форма тупиковой полости — цилиндр диаметром  $D = 12$  мм и глубиной  $H = 14$  мм;
- толщина основания соплодержателя  $h_2 = 2$  мм;
- внутренний диаметр сопла  $d = 2; 2,5; 3$  мм;
- толщина стенки сопла 0,5 мм;

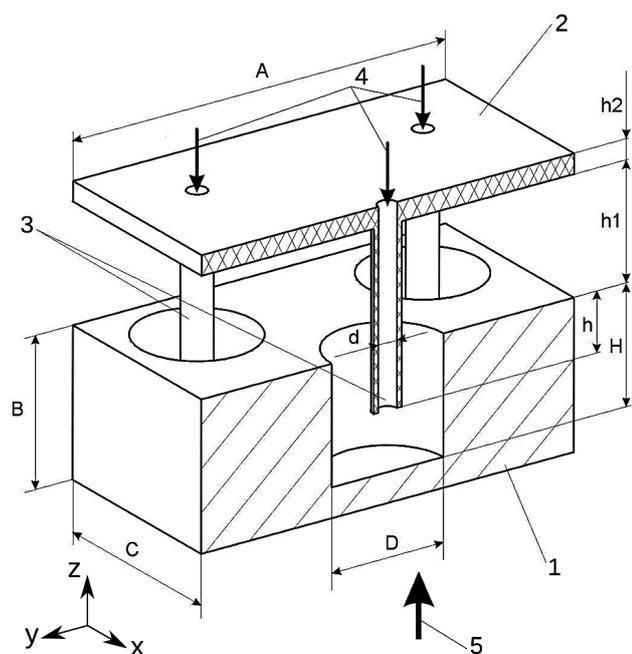


Рис. 1. Конструкция импактно-струйного радиатора с тупиковыми полостями:  
1 — радиатор; 2 — соплодержатель; 3 — сопло; 4 — вход воздуха; 5 — подвод теплового потока

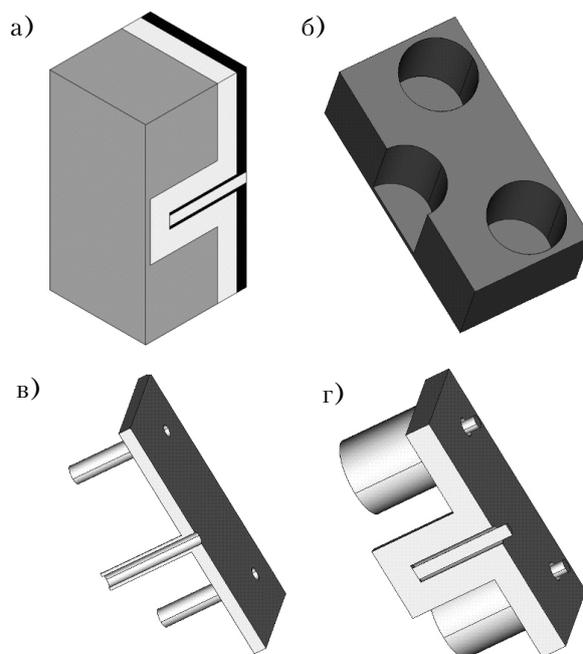


Рис. 2. 3D-модель расчетной области радиатора:  
а — общий вид; б — радиатор с тупиковыми полостями; в — соплодержатель; г — проточный объем

- отношение длины сопла к его диаметру  $(h + h_1 + h_2)/d = 5,33 - 8,0$ ;
- глубина погружения среза сопла в тупиковую полость  $h = 6; 10; 12$  мм;
- зазор между соплодержателем и радиатором  $h_1 = 8; 4; 2$  мм;
- материал радиатора — медь;
- материал соплодержателя — пенопласт.

**Математическая модель**

При проведении моделирования были приняты следующие допущения:

- в расчетной области имеет место турбулентный режим течения с  $k$ - $\epsilon$ -моделью турбулентности;
- вязкость, теплопроводность и плотность воздуха не зависят от температуры;
- в расчетной области имеет место стационарное течение воздушного потока;
- гравитационные силы пренебрежимо малы.

С учетом сделанных допущений математическая модель течения и сопряженного теплообмена в расчетной области представлялась уравнениями неразрывности, сохранения энергии и Навье–Стокса в проекциях на координатные оси  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  (направление оси  $Z$  совпадает с направлением осей сопел, а направление оси  $X$  перпендикулярно плоскости симметрии):

- уравнение неразрывности

$$\frac{\partial V_x}{\partial X} + \frac{\partial V_y}{\partial Y} + \frac{\partial V_z}{\partial Z} = 0; \tag{1}$$

- уравнение сохранения энергии

$$V_x \frac{\partial T}{\partial X} + V_y \frac{\partial T}{\partial Y} + V_z \frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{k}{C_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right); \tag{2}$$

- уравнение Навье–Стокса в проекциях на координатные оси

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial X} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial Y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial Z^2} \right); \tag{3}$$

$$V_x \frac{\partial V_y}{\partial X} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial Y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_y}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial Z^2} \right); \tag{4}$$

$$V_x \frac{\partial V_z}{\partial X} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial Y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial Z^2} \right); \tag{5}$$

- где  $T$  — температура в расчетной области, °С;  
 $V_x, V_y, V_z$  — проекции вектора скорости воздуха на координатные оси, м/с;  
 $k, \rho, C_p$  — теплопроводность, Вт/(м·°С), плотность, кг/м<sup>3</sup>, и теплоемкость, Дж/(кг·°С), соответствующей среды (воздуха, радиатора или соплодержателя);  
 $\mu$  — вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с;  
 $P$  — давление воздушного потока, Па.

Граничные условия для уравнений (1)–(5) следующие:

- на поверхностях радиатора и соплодержателя, контактирующих с проточным объемом,  $V_x = V_y = V_z = 0$ ;
- на границе проточного объема, совпадающей с плоскостью симметрии,  $V_x = 0$ ;
- на поверхностях проточного объема, контактирующих с окружающей средой,  $P = 0$ ;
- скорость воздуха на входе в сопло  $V$  совпадает со скоростью  $V_z$  в этом сечении;
- температура воздуха на входе в сопло равна температуре окружающей среды  $T_0$ ;
- к основанию радиатора подводится тепловой поток  $Q$ ;
- на поверхностях радиатора и соплодержателя, не контактирующих с проточным объемом, имеют место адиабатные условия.

При выборе диапазона значений скорости истечения воздуха из сопел учитывалось ограничение на уровень акустических шумов — не более 60 дБ для лабораторных помещений [8]. Исходя из этого, максимальная скорость воздуха  $V_0$  для сопел расчетной области не превышала 100 м/с.

Используя рассмотренную математическую модель, в расчетной области определялись поля температуры, скоростей и линий тока. Решение задачи проводилось в CAD/CAE-системе проектирования на платформе операционной системы CAELinux, используя алгоритм CFD-моделирования, приведенный в [9].

По результатам моделирования оценивалось тепловое сопротивление радиатора

$$R = \frac{T_R - T_0}{Q}, \tag{6}$$

где  $T_R$  — максимальная температура радиатора, °С.

**Результаты моделирования и их анализ**

Результаты моделирования представлены на рис. 3 и в таблице. Их анализ показывает, что в диапазонах исследованных значений скорости воздуха на входе в сопло (50–100 м/с) и диаметра сопла (2–3 мм) тепловое сопротивление исследованного импактно-струйного радиатора с тупиковыми полостями изменяется от 0,9 до 2,6°С/Вт, чего вполне достаточно для проведения термотренировки некоторых типов микропроцессоров с заданием ряда режимов их функционирования [1].

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

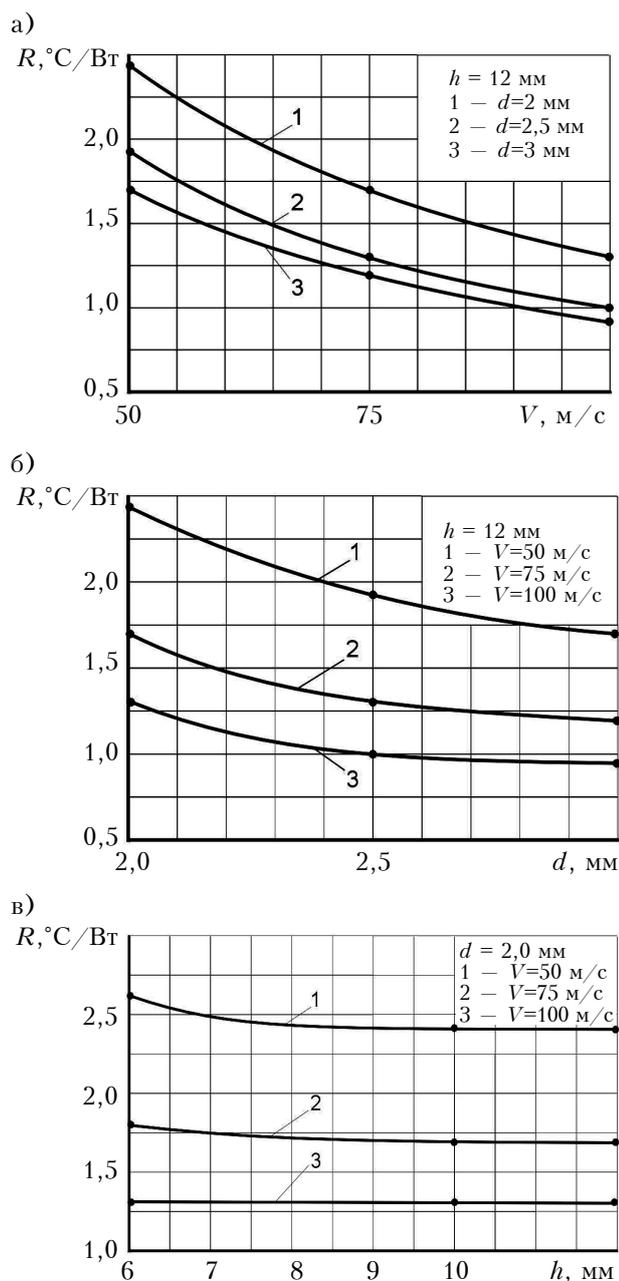


Рис. 3. Зависимость теплового сопротивления радиатора от скорости воздуха на входе в сопло (а), от диаметра сопла (б) и от глубины погружения среза сопла в тупиковую полость (в)

Наиболее влияющим на тепловое сопротивление радиатора параметром является скорость воздуха в струе. Как видно из рис. 3, а, увеличение скорости воздуха на входе в сопло до 100 м/с может привести к заметному уменьшению теплового сопротивления. Однако поскольку увеличение скорости связано с ростом уровня акустических шумов, представляется целесообразным провести отдельное исследование их взаимосвязи.

Как видно из рис. 3, б, для исследованной геометрии радиатора предпочтительным значением диаметра сопел является 2,5–3,0 мм. Тепловое сопротивление радиатора  $R$  значительно растет при уменьшении диаметра до 2 мм (а также и с уменьшением скорости воздуха на входе в сопло) и практически не изменяется при увеличении более 3,0 мм.

На рис. 3, в видно, что изменение глубины погружения среза сопла в тупиковую полость от 6 до 12 мм не оказывает существенного влияния на тепловое сопротивление радиатора, а значит, этот параметр может выбираться, исходя главным образом из требований к габаритам конструкции.

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что для исследованной геометрии радиатора при скорости воздуха на входе в сопло 50–100 м/с значения потерь напора воздуха лежат в диапазоне 3466–20823 Па, при этом требуемый расход воздуха составляет 0,56–2,54 м<sup>3</sup>/ч. Такие значения избыточного давления и расхода воздуха без труда могут быть созданы современными компрессорами, предназначенными для стационарного обеспечения воздухом высокого давления промышленных предприятий, исследовательских лабораторий, а также их подразделений, связанных с проведением разнообразных тепло-аэродинамических испытаний изделий электронной техники, в том числе термотренировок. По сравнению с осевыми и центробежными вентиляторами, традиционно применяемыми для обеспечения тепловых режимов микропроцессоров, импактно-струйный радиатор с тупиковыми полостями работает при меньшем (на порядок) количестве воздуха и большем (на два порядка) избыточном давлении, что является прямой платой за компактность и высокое аэродинамическое сопротивление исследованного радиатора.

*Зависимость потери напора воздуха в радиаторе  $\Delta H$  от скорости воздуха  $V$  на входе в сопло, диаметра сопла  $d$  и глубины погружения среза сопла в тупиковую полость  $h$*

$V, \text{ м/с}$	Потери напора воздуха в радиаторе $\Delta H, \text{ Па}$ , при:				
	$d = 2,0 \text{ мм}$			$d = 2,5 \text{ мм}$	$d = 3,0 \text{ мм}$
	$h = 6 \text{ мм}$	$h = 10 \text{ мм}$	$h = 12 \text{ мм}$	$h = 12 \text{ мм}$	
50	5372	5335	5339	4572	3466
75	11811	11712	11730	9957	7847
100	20823	20599	20504	17495	14007

**Заклучение**

В результате проведенного исследования установлено, что импульсно-струйный радиатор с тупиковыми полостями может быть эффективным решением для отвода теплоты от микропроцессоров в ограниченном пространстве, характерном при проведении такого вида их испытаний, как термотренировка. Вместе с тем следует учитывать, что радиатор указанного типа обладает высоким аэродинамическим сопротивлением и требует для своей работы источника воздуха высокого давления.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Spokoyny M., Trofimov V. Collider jets cooling method of microprocessors // Proc. of the 2011 International Microelectronics and Packaging Society ATW on Thermal Management, Session 12 "Liquid, phase-change and refrigeration cooling". – Palo Alto, CA, USA. – 2011. – P. 1–18.
2. Spokoyny M., Trofimov V., Qiu X., Kerner J. M. Enhanced heat transfer in a channel with combined structure of pins and dimples // Proc. of the 9th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. – San Francisco, CA, USA. – 2006. – P. 1–21.
3. Булавин Л. А., Актан О. Ю., Николаенко Т. Ю., Николаенко Ю. Е. Экспериментальное исследование температурного поля радиатора кулера // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2006. – № 5. – С. 61–64.

4. Письменный Е. Н., Рогачев В. А., Баранюк А. В., Цвященко Я. В. Теплоотводящая поверхность с пластинчато-просечным оребрением при низкоскоростном обдуве // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – № 4. – С. 43–45.
5. Рассемакин Б. М., Рогачев В. А., Хайрнатов С. М. Кулеры на тепловых трубах для теплонагруженных компонентов персональных компьютеров // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2006. – № 4. – С. 48–50.
6. Спокойный Ю. Е., Трофимов В. Е., Олибаш Г. В. Выбор конструктивных параметров радиаторов для струйного импульсного охлаждения БИС // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1998. – № 1. – С. 18–19.
7. Спокойный Ю. Е., Трофимов В. Е., Олибаш Г. В. Проектирование радиаторов для ИС со струйным импульсным воздушным охлаждением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1998. – № 2. – С. 17–19.
8. Березуцкий В. В. Основи охорони праці. Харків: Факт. – 2007.
9. Трофимов В. Е., Павлов А. Л., Жмуд Е. В. Визуализация взаимодействия струй с тупиковой полостью радиатора для жидкостного охлаждения микропроцессора // Труды 16-й МНПК «СИЭТ-2015». – Украина, Одесса. – 2015. – С. 160–161.

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 14.11 2016 г.*

*К. т. н. В. Є. ТРОФІМОВ, к. т. н. О. Л. ПАВЛОВ, О. О. МОКРОУСОВА*

*Украина, Одесский национальный политехнический университет*

*E-mail: vovic@ukr.net*

## CFD-МОДЕЛЮВАННЯ РАДІАТОРА ДЛЯ ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ МІКРОПРОЦЕСОРІВ В ОБМЕЖЕНОМУ ПРОСТОРИ

*Проведено CFD-моделювання радіатора з компактною поверхнею тепловіддачі у вигляді тупикових порожнин, у які втікають імпульсні повітряні струмені. Отримано тепло-аеродинамічні характеристики і дано рекомендації щодо конструювання радіаторів такого типу для відводу тепла від мікропроцесорів в обмеженому просторі.*

*Ключові слова: CFD-моделювання, радіатор, тепловий опір, імпульсні струмені, напівпровідникові мікросхеми.*

DOI: 10.15222/TKEA2016.4.30  
UDC 536. 24

*V. E. TROFIMOV, A. L. PAVLOV, E. A. MOKROUSOVA*

*Ukraine, Odessa national polytechnic university*

*E-mail: vovic@ukr.net*

## CFD-SIMULATION OF RADIATOR FOR AIR COOLING OF MICROPROCESSORS IN A LIMITED SPACE

*One of the final stages of microprocessors development is heat test. This procedure is performed on a special stand, the main element of which is the switching PCB with one or more mounted microprocessor sockets, chipsets, interfaces, jumpers and other components which provide various modes of microprocessor operation.*

*The temperature of microprocessor housing is typically changed using thermoelectric module. The cold surface of the module with controlled temperature is in direct thermal contact with the microprocessor housing designed for cooler installation. On the hot surface of the module a radiator is mounted. The radiator dissipates the cumulative heat flow from both the microprocessor and the module.*

High density PCB layout, the requirement of free access to the jumpers and interfaces, and the presence of numerous sensors limit the space for radiator mounting and require the use of an extremely compact radiator, especially in air cooling conditions. One of the possible solutions for this problem may reduce the area of the radiator heat-transfer surfaces due to a sharp growth of the heat transfer coefficient without increasing the air flow rate. To ensure a sharp growth of heat transfer coefficient on the heat-transfer surface one should make in the surface one or more dead-end cavities into which the impact air jets would flow.

CFD simulation of this type of radiator has been conducted. The heat-aerodynamic characteristics and design recommendations for removing heat from microprocessors in a limited space have been determined.

Keywords: CFD-modeling, radiator, heat resistance, impact jet, microprocessor.

REFERENCES

1. Spokoyny M., Trofimov V. Collider jets cooling method of microprocessors. *Proc. of the 2011 International Microelectronics and Packaging Society ATW on Thermal Management, Session 12 "Liquid, phase-change and refrigeration cooling"*. Palo Alto, CA, USA, November 7-9, 2011, pp. 1-18.
2. Spokoyny M., Trofimov V., Qiu X., Kerner J.M. Enhanced heat transfer in a channel with combined structure of pins and dimples // *Proc. of the 9<sup>th</sup> AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*, San Francisco, CA, USA, 2006, pp. 1-21.
3. Bulavin L.A., Aktan O.Yu., Nikolaienko T.Yu., Nikolaienko Yu.E. [Experimental examination of a temperature field of a heat sink cooler]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 2006. no 5, pp. 61-64. (Rus)
4. Pismenniy E. N., Rogachev V. A., Baranjuk A. V., Tsvyachenko E. V. [Thermal efficiency of with plate-cut fins in conditions low speed to blow]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 2005, no 4, pp. 43-45 (Rus)
5. Rassamakin B. M., Rogachev V. A., Khayrnasov S. M. [Coolers based on heat pipes for thermally loaded devices of personal computers]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 2006, no 4, pp. 48-50. (Rus)
6. Spokoyny Ju.E., Trofimov V.E., Olibash G.V. [The choice of constructional parameters of heat radiators for LSIC jet impact cooling]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 1998, no 1, pp. 18-19. (Rus)
7. Spokoyny Ju.E., Trofimov V. E., Olibash G. V. [The designing of heat radiators for IC with jet impact air cooling]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 1998, no 2, pp. 17-19. (Rus)
8. Berezuts`kii V.V. [*Fundamentals of labor protection*]. Kharkov, Fact, 2007, 241 p. (Rus)
9. Trofimov V. E., Pavlov A. L., Zhmud E. V. [Visualization of the interaction of a jet with a dead-end cavity of the radiator for liquid cooling of a microprocessor]. *Proc. of the 16<sup>th</sup> International scientific-practical conference "Modern information and electronic technologies"*, Ukraine, Odessa, 2015, pp. 160-161. (Rus)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлёв Ю. И. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 2. Каскадные устройства.— Одесса: Политехпериодика, 2016.— 124 с.**

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

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

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



Д. ф.-м. н. В. П. МАХНИЙ, к. ф.-м. н. И. И. ГЕРМАН, Г. И. БОДЮЛ, И. М. СЕНКО

Украина, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

E-mail: i.herman@chnu.edu.ua

## ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК ZnSe:Te НА ИХ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

*В настоящей работе исследовано влияние модификации поверхности подложек ZnSe:Te на их спектры люминесценции и оптического пропускания. Путем травления подложек ZnSe:Te в растворах  $\text{CrO}_3:\text{HCl}=2:1$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2=3:1$  были получены образцы с зеркальной и матовой поверхностями соответственно. Установлено, что для образцов с матовой поверхностью характерно существенное увеличение эффективности голубой полосы люминесценции, а также появление излучения в той области энергии фотонов, где она больше ширины запрещенной зоны селенида цинка.*

*Ключевые слова:* селенид цинка, зеркальная и матовая поверхности, квантово-размерный эффект, люминесценция, пропускание.

Перспективность использования селенида цинка для коротковолновой оптоэлектроники стимулирует исследования, направленные на улучшение параметров и ZnSe, и барьерных детекторов на его основе [1]. Отметим, что преимущественно электронная проводимость ZnSe и отсутствие среди широкозонных соединений II–VI групп дырочного полупроводника с близкими кристаллохимическими параметрами — главные причины отсутствия идеальных гетероструктур с  $p-n$ -переходом [2]. Альтернативой таким структурам могут быть выпрямляющие контакты «метал — ZnSe», на основе которых, в частности, уже созданы широкополосные (0,2–0,47 мкм) фотодетекторы с максимальной монохроматической чувствительностью  $S_\lambda \approx 0,15$  А/Вт. При длине волны  $\lambda = 0,2$  мкм их чувствительность не превышает 0,02 А/Вт, что обусловлено увеличением скорости поверхностной рекомбинации  $v_s$ . Очевидно, что в этом случае одной из основных задач является поиск способов уменьшения  $v_s$ , особенно в области высоких энергий фотонов  $\hbar\omega$  (малых  $\lambda$ ), когда роль поверхности существенно возрастает. Перспективными здесь могут оказаться технологии, вызывающие изменения (модификацию) свойств поверхностных слоев полупроводниковых подложек и при этом не влияющие на их объемные параметры. Один из путей — создание микропористой структуры, обладающей рядом специфических свойств, в основе которых лежат квантово-размерные эффекты [4].

Настоящая работа посвящена исследованию влияния модификации поверхности подложек ZnSe:Te на их спектры люминесценции и оптического пропускания.

### Образцы и методы исследований

Исходными подложками служили пластинки типоразмером 4×4×1 мм, вырезанные из объемного кристалла ZnSe:Te, который был выращен из расплава под давлением инертного газа.

Легирование изовалентной примесью Te в процессе роста до концентрации примерно  $10^{19}$  см<sup>-3</sup> приводит к появлению эффективной красно-оранжевой полосы люминесценции и существенному увеличению температурной и радиационной стойкости ее параметров [5]. Для достижения величины электронной проводимости  $10^{-1}$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup> подложки отжигались в течение нескольких часов в насыщенных парах цинка при температуре 850°C. При этом подложки ZnSe и навеска элементарного Zn в количестве, необходимом для создания насыщенных паров, находились в противоположных концах запаянной кварцевой ампулы. После отжига пластинки подвергались механической полировке и химическому травлению в различных растворах. В результате обработки в хромовом травителе  $\text{CrO}_3:\text{HCl} = 2:3$  поверхность подложек выглядела зеркальной (тип 1), а в растворе состава  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2 = 3:1$  — матовой (тип 2). Удаление продуктов травления осуществлялось путем длительного (5–10 мин) кипячения пластинок в дистиллированной воде и последующего кратковременного ополаскивания в концентрированной уксусной кислоте. В изготовленных по данной технологии подложках наблюдалась объемная фотолюминесценция (ФЛ), которая отсутствовала у образцов, прошедших только механическую полировку.

Люминесценция возбуждалась  $\text{N}_2$ -лазером с длиной волны  $\lambda_m = 0,337$  мкм, а спектры излу-

чения  $N_{\omega}$  измерялись на универсальной установке, позволяющей работать в обычном и дифференциальном режимах. В ее состав входит дифракционный монохроматор МДР-23 и стандартная система синхродетектирования с автоматической записью спектральных характеристик. Источником излучения при измерении спектров оптического пропускания  $T_{\omega}$  служила галогенная лампа с «гладким» спектром. Морфология поверхности подложек изучалась с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) типа NT-206, а все исследования проводились при комнатной температуре.

### Обсуждение результатов исследований

Как видно из рис. 1, спектр ФЛ образцов с зеркальной поверхностью состоит из широкой красно-оранжевой  $R$ -полосы, на высокоэнергетическом «крыле» которой наблюдается перегиб в области энергий, близких к ширине запрещенной зоны селенида цинка ( $E_g \approx 2,7$  эВ [5]).

В отличие от этого, для подложек с матовой поверхностью краевое излучение становится доминирующим по отношению к низкоэнергетическому, причем его эффективность существенно возрастает. Последнее указывает на уменьшение скорости поверхностной рекомбинации, которая, на наш взгляд, является следствием модификации поверхности. Подтверждением этому могут служить описанные в [6] исследования, где показано, что подобная модификация поверхности вызывает не только увеличение эффективности краевой люминесценции подложек CdTe, но и существенное улучшение физико-технических параметров поверхностно-барьерных фотодиодов на их основе.

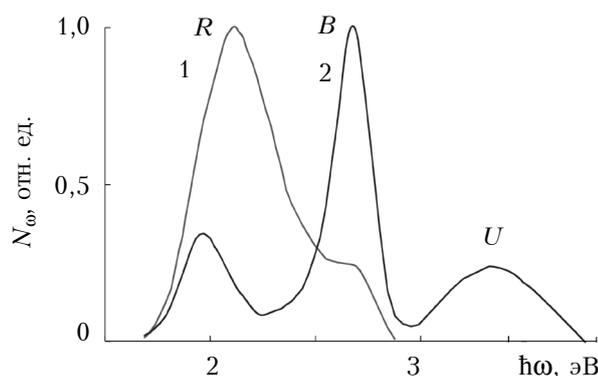


Рис. 1. Нормированные в максимумах спектры фотолюминесценции образцов ZnSe:Te с зеркальной (1) и матовой (2) поверхностями, полученные при температуре 300 К

Следует также обратить внимание на появление в спектре ФЛ образцов типа 2  $U$ -полосы в области энергии фотонов, где она заметно превышает ширину запрещенной зоны ZnSe. Это может быть обусловлено наличием квантово-размерной структуры, что подтверждается экспериментально АСМ-топограммами, представ-

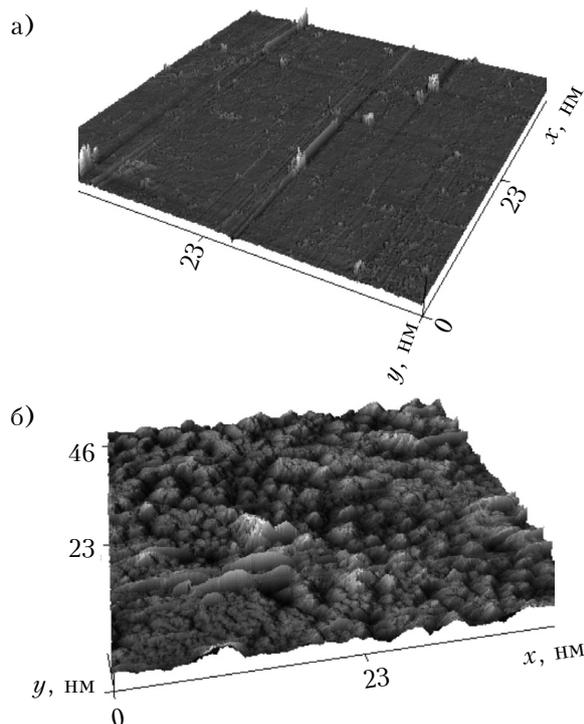


Рис. 2. АСМ-топограммы образцов ZnSe:Te с зеркальной (а) и матовой (б) поверхностями

ленными на рис. 2. Здесь видно, что поверхность подложек типа 1 является практически гладкой, без каких-либо структурных особенностей. Поверхность же образцов типа 2 состоит из одинаково ориентированных пирамид с размером основания 2–5 мкм, каждая из которых является объединением нанопирамид с латеральными размерами 10–100 нм.

Таким образом, наиболее вероятный механизм формирования  $U$ -полосы — квантово-размерный эффект, который заключается в увеличении ширины запрещенной зоны сферического нанокристалла по сравнению с бесконечным. В этом случае изменение энергии излучательного перехода может быть представлено в виде [7]

$$\hbar\omega_m - E_g = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2d^2} \left( \frac{1}{m_n^*} + \frac{1}{m_p^*} \right), \quad (1)$$

где  $d$  — диаметр сферического монокристалла;  $m_n^*$ ,  $m_p^*$  — эффективная масса электрона и дырки соответственно (для ZnSe  $m_n^* = 0,17m_0$ ,  $m_p^* = 0,75m_0$  [5]).

Формула (1) позволяет оценить средний размер нанокристаллов, определяющих максимум высокоэнергетической  $U$ -полосы  $\hbar\omega \approx 3,4$  эВ. В результате расчета было получено значение около 3,5 нм, а это примерно в три раза меньше латерального размера самых мелких пирамид. Такое, на первый взгляд, противоречие объясняется тем, что излучение в максимум  $U$ -полосы формируется вершинами пирамид. Косвенным подтверждением этого является наличие в спек-

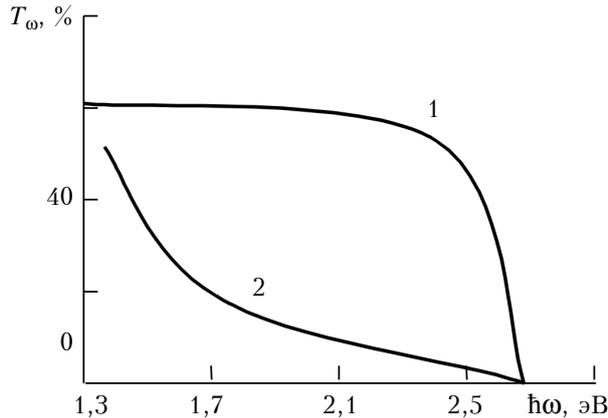


Рис. 3. Спектры оптического пропускания образцов ZnSe:Te с зеркальной (1) и матовой (2) поверхностями, полученные при температуре 300 К

тре ФЛ фотонов с  $h\omega > 3,4$  эВ, связанных с нанобъектами еще меньших, чем 3,5 нм, размеров.

Присутствие в спектре ФЛ квантов в области энергии  $E_g - h\omega_m$  вызвано большой дисперсией размеров нанокристаллов (от 10 до 100 нм). Отметим, что большие из них, слабо влияя на спектральное распределение высокоэнергетического излучения ( $U$ -полоса), вызывают существенные изменения оптического пропускания. На рис. 3 обращает на себя внимание резкое уменьшение абсолютного значения  $T_\omega$  при  $h\omega < E_g$  образцов типа 2, что объясняется увеличением процессов рассеяния на нанокристаллах больших размеров.

Отметим, что с точки зрения прохождения излучения подложки типа 2 можно считать рассеивающей средой с поверхностными неоднородностями различных размеров  $d$ , в том числе и с  $d \geq 0,1 - 0,2\lambda_m$  (здесь  $\lambda_m \approx 460$  нм — длина волны, соответствующая краю фундаментального поглощения ZnSe). При выполнении данного неравенства справедлив закон Релея  $I_d \approx \lambda^{-4}$  (где  $I_d$  — интенсивность рассеянного света), в связи с чем доля рассеянного света резко увеличивается с ростом длины волны. Это вызывает уменьшение нормальной составляющей интенсивности прошедшего через подложку излучения и, как следствие, соответствующее падение величины оптического пропускания.

### Заключение

Таким образом, приведенные в работе результаты свидетельствуют о возможности управления параметрами люминесцентного излучения (эффективностью и спектральным составом) подложек ZnSe:Te путем изменения морфологии их поверхности. При этом установлено, что обработка подложек в растворе  $H_2SO_4:H_2O_2 = 3:1$  приводит к образованию поверхностной квантово-размерной структуры, которая вызывает появление в спектрах фотолюминесценции широкой полосы в области значений энергии, больших ширины запрещенной зоны селенида цинка.

Дальнейшие исследования будут направлены на поиск технологических режимов обработки подложек с целью уменьшения дисперсии размеров нанокристаллов для сужения спектральной полосы излучения и увеличения ее эффективности.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кульчицкий Н. А., Наумов А. В. Современные оптоэлектронные приборы на основе селенида цинка // Нанотехнология. — 2014. — № 11. — С. 19–26.
2. Физика соединений  $A_{II}B_{VI}$  / Под ред. Георгобини А.Н., Шейкман М.К. — Москва: Мир, 1986.
3. Махний В.П. УФ фотоприемники с барьером Шоттки на основе селенида цинка // Журнал технической физики. — 1998. — Т. 68, № 9. — С. 123–125.
4. Дмитрук М. Л., Барлас Т. Р., Сердюк В. О. Пористі напівпровідники  $A_3B_5$ : технологія електрохімічного пороутворення, структура та оптичні властивості (огляд) // Фізика і хімія твердого тіла. — 2010. — Т.11, № 5. — С. 13–33.
5. Рыжиков В. Д. Сцинтилляционные кристаллы полупроводниковых соединений  $A^{III}B^{VI}$ . Получение, свойства, применение. — Москва: НИИТЭХИМ, 1989.
6. Махний В. П., Герман И. И., Черных Е. И. Влияние обработки на параметры поверхности монокристаллических подложек теллурида кадмия // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2013. — № 6. — С. 65–67.
7. Аверхий Н. С., Казанова Л. П., Лебедев Э. А., Рудь Ю. В., Смирнов А. Н., Смирнова Н. Н. Оптические и электрические свойства пористого арсенида галлия // Физика и техника полупроводников. — 2000. — Т. 34, №6. — С. 757–761.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 05.10.2016 г.

В. П. МАХНИЙ, И. И. ГЕРМАН, Г. И. БОДЮЛ, И. М. СЕНКО

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
E-mail: i.herman@chnu.edu.ua

### ВПЛИВ МОРФОЛОГІЇ ПОВЕРХНІ ПІДКЛАДОК ZnSe:Te НА ЇХ ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Досліджено вплив модифікації поверхні підкладок ZnSe:Te на їх спектри люмінесценції та оптичного пропускання. Шляхом травлення підкладок ZnSe:Te в розчинах  $CrO_3:HCl=2:1$  та  $H_2SO_4:H_2O_2=3:1$  були отримані зразки із дзеркальною і матовою поверхнями відповідно. Встановлено, що для зразків з мато-

вою поверхню характерно істотно збільшення ефективності блакитної смуги люмінесценції, а також поява випромінювання в тій області енергії фотонів, де вона більше ширини забороненої зони селеніду цинку.

Ключові слова: селенід цинку, дзеркальна і матова поверхні, квантово-розмірний ефект, люмінесценція, пропускання.

DOI: 10.15222/TKEA2016.6.36  
UDC 625.315.592; 535.37

V. P. MAKHNIY, I. I. HERMAN, G. I. BODUL, I. M. SENKO  
Ukraine, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University  
E-mail: i.herman@chnu.edu.ua

## INFLUENCE OF ZNSE:TE SUBSTRATE'S SURFACE MORPHOLOGY ON THEIR OPTICAL PROPERTIES

The authors have experimentally established, that etching of ZnSe:Te substrates in  $\text{CrO}_3:\text{HCl}=2:1$  and  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2=3:1$  solutions leads to formation of mirror and matte surfaces. Analysis of the topogram obtained by an atomic power microscope showed that matte surface is a set of equally oriented pyramids with basis size  $2-5 \mu\text{m}$  and each of them is association of nanopyramids with  $10-100 \text{ nm}$  lateral size. In such samples wide photoluminescence band at  $2,7-3,8 \text{ eV}$  is a result of dimensional quantization in smaller nanocrystals. The latter also causes an observed decrease of transmission coefficient of substrates with matte surface in comparison to those with mirror surface owing to increase of light scattering processes.

Keywords: zinc selenide, mirror and matte surfaces, quantum-dimensional effect, luminescence, transmission.

### REFERENCES

1. Kulchitskiy N. A., Naymov A. V. [Modern optoelectronic devices on zinc selenide basis]. *Nanoinzheneriya*, 2014, no 11, pp. 19-26. (Rus)
2. *Fizika soedinenii  $\text{A}_2\text{B}_6$*  [Physics of  $\text{A}_2\text{B}_6$  compounds]. Ed. by Georgobiani A. N., Sheikhan M.K., Moscow, Mir, 1986. (Rus)
3. Makhniy V. P. [UV photodetectors with Shottki barrier on zinc selenide basis]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1998, vol. 68, no 9, pp. 123-125. (Rus)
4. Dmitruk M. L., Barlas T. R., Serdiuk V. O. [ $\text{A}_3\text{B}_5$  porous semiconductors: Electrochemical pore formation technology, structure and optical properties (review)] *Fizika i khimiya tverdogo tila*, 2010, vol. 11, no 5, pp. 13-33. (Ukr)
5. Rujukov V. D. *Stsintilyatsionnye kristally poluprovodnikovykh soedinenii  $\text{A}_{II}\text{B}_{VI}$* . Poluchenie, svoystva, primeneniye [Scintillation crystals of  $\text{A}_{II}\text{B}_{VI}$  semiconductor junctions. Obtaining, properties and usage]. Moscow, NIITECHIM, 1989, 125 p. (Rus)
6. Makhniy V. P., Herman I. I., Chernuh E. I. [Influence of processing on the surface parameters of single-crystal substrates of cadmium telluride]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*, 2013, no 6, pp. 65-67. (Rus)
7. Averhiev N. S., Casanova L. P., Lebedev E. A., Rud Yu. V., Smirnov A. N., Smirnova N. N. [Optical and electrical properties of porous gallium arsenide] *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2000, vol 34, no 6, pp. 757-761. (Rus)

К. т. н. А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО, к. т. н. И. В. ЦЕВУХ,  
И. А. ВАЛЯНСКИЙ, Ю. С. ЧИХРАЙ

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

## ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ И ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН ISM-ДИАПАЗОНА С ПОМОЩЬЮ WiFi-МАРШРУТИЗАТОРОВ

*Предложена методика измерения частотной характеристики и диаграммы направленности антенн, предназначенных для беспроводного доступа в диапазоне частот 2,4 ГГц с использованием трансивера WiFi-маршрутизаторов. Приведены результаты лабораторного измерения амплитудной диаграммы направленности и частотной характеристики семизлементной антенны типа «волновой канал».*

*Ключевые слова: WiFi-маршрутизатор, генератор СВЧ, диаграмма направленности, коэффициент направленного действия.*

Для беспроводного обмена данными во всем мире используются частоты нелицензируемого диапазона ISM (industrial, scientific, medical), среди которых самыми востребованными являются 2,4 и 5 ГГц. Освоение диапазона радиочастот 5 ГГц в Украине начато сравнительно недавно, в отличие от диапазона 2,4 ГГц, в котором функционирует большая часть различных беспроводных систем, например Bluetooth, Wi-Fi, роутер стандарта 802.15.4, ZigBee и др. [1, 2], а потому ужесточаются требования к электромагнитной совместимости технических средств. При этом качество беспроводной сети зависит как от рабочего диапазона частот оборудования, энергетических параметров беспроводной сети, рельефа местности, климата, уровня помех и ряда других факторов, так и от характеристик антенн.

В большинстве случаев фирма-изготовитель направленных антенн, предназначенных для беспроводных сетей, приводит в паспортных данных ряд характеристик, среди которых наиболее важными являются амплитудная диаграмма направленности (ДН) и частотная характеристика (ЧХ), под которой подразумевается изменение коэффициента усиления в рабочей полосе частот [3] либо зависимость напряженности электромагнитного поля в дальней зоне в направлении главного максимума диаграммы направленности от частоты [4].

Как известно, один из способов обеспечения электромагнитной совместимости — это выбор антенн с соответствующими диаграммами направленности, которые обладают «провалами» в направлении на источник помех [6–8], а также формирование частотной характеристики антенны со сниженным коэффициентом усиления на частотах мешающих каналов.

Таким образом, при развертывании беспроводных сетей важно получить информацию об уровне сигнала в пределах рабочей полосы передающей антенны, а также о ее амплитудной диаграмме направленности по мощности. При этом, однако, оборудование, позволяющее измерять характеристики направленности антенн в реальных условиях, является и весьма дорогостоящим, и сложным в развертывании, настройке и обслуживании.

В настоящей работе предложена упрощенная методика измерения диаграммы направленности и частотной характеристики антенн для оперативной оценки электромагнитной обстановки при развертывании беспроводных сетей, когда требования к точности измерений не критичны.

Рассмотрим приведенную на **рис. 1** модифицированную схему измерителя ДН и ЧХ, которая была представлена в [5]. (Следует отметить, что все измерения проводятся на приемной стороне.)

Исследуемая направленная антенна А1, работающая в режиме передачи и расположенная на опорно-поворотном механизме, подключается к перестраиваемому СВЧ-генератору с помощью коаксиальной линии через блок согласования сопротивлений. Управление параметрами генератора, такими как частота и амплитуда сигнала, осуществляется с помощью блока управления и индикации. На расстоянии  $r$  в дальней зоне находится приемная ненаправленная антенна А2, подключенная к регистрирующему устройству также через блок согласования сопротивлений. Для удобства проведения измерений и анализа их результатов, все данные с выхода регистрирующего устройства подаются на персональный компьютер.

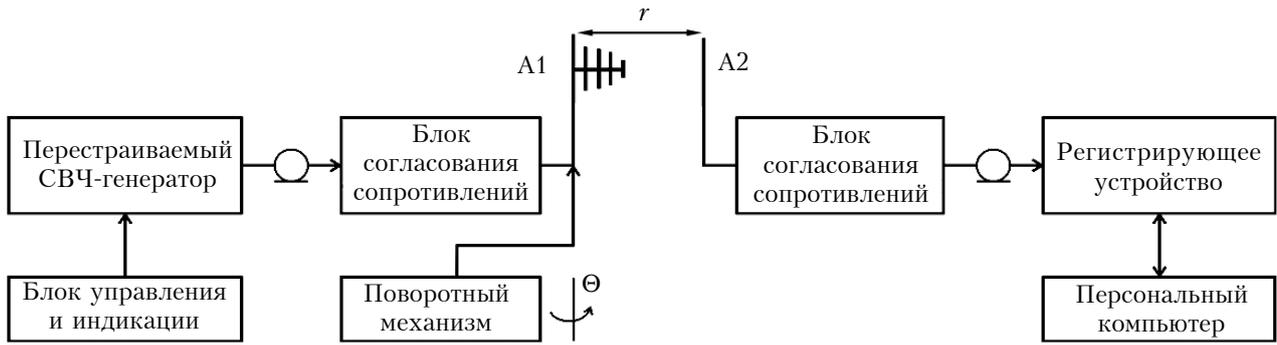


Рис. 1. Модифицированная схема измерителя диаграммы направленности и частотной характеристики антенн

Амплитудная ДН передающей антенны А1 оценивается как функция напряжения на клеммах приемной антенны А2 от угла поворота антенны А1 в соответствующей плоскости. Напряженность поля, создаваемого передающей антенной А1 в точке расположения приемной антенны А2, вычисляется по формуле

$$E(\Theta, \varphi) = \frac{1}{r} \sqrt{30P_{\Sigma}G_0F(\Theta, \varphi)} = \frac{1}{r} \sqrt{30P_{\Sigma}G(\Theta, \varphi)}, \quad (1)$$

- где  $P_{\Sigma}$  — мощность излучения антенны;
- $G_0$  — коэффициент усиления антенны по мощности (в раз) в направлении максимума излучения;
- $F(\Theta, \varphi)$  — амплитудная нормированная характеристика направленности, которая характеризует угловое распределение амплитуды поля;
- $G(\Theta, \varphi)$  — функция зависимости коэффициента усиления антенны по мощности от направления.

Формула (1) справедлива, когда наблюдатель расположен в дальней зоне антенны.

При измерении амплитудной ДН в исследуемой плоскости необходимо обеспечить одинаковую поляризацию приемной и передающей антенн, тогда влияние поляризационной составляющей можно не учитывать, а напряжение на клеммах приемной антенны будет связано с амплитудной ДН передающей антенны следующим образом:

$$U(\Theta) = AF(\Theta), \quad (2)$$

где  $A$  — амплитудный коэффициент пропорциональности, зависящий от коэффициента полезного действия (степени согласования приемной антенны с нагрузкой).

При измерении характеристик передающей антенны предполагается, что характеристики приемной антенны известны.

Частотная характеристика передающей антенны измеряется в максимуме ДН ( $\Theta = \Theta_{\max}$ ) при частоте, которая изменяется в диапазоне 2412–2477 МГц, что соответствует полосе от первого до четырнадцатого канала. При этом амплитудно-частотная характеристика канала, который включает в себя все элементы — от под-

ключенного к входу передающей антенны генератора до нагрузки приемной антенны, определяется по обобщенной формуле Фрииса

$$\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{пер}}} = \eta_{\text{пер}}(\omega) \eta_{\text{пр}}(\omega) \left(1 - |\Gamma_{\text{пер}}(\omega)|^2\right) \times \left(1 - |\Gamma_{\text{пр}}(\omega)|^2\right) \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \times D_{\text{пер}}(\omega, \Theta, \varphi) D_{\text{пр}}(\omega, \Theta_1, \varphi_1), \quad (3)$$

- где  $P_{\text{пр}}$  — мощность на нагрузке приемной антенны;
- $P_{\text{пер}}$  — мощность на выходе генератора (передатчика);
- $\eta, \Gamma, D$  — КПД, коэффициент отражения и коэффициент направленного действия приемной (индекс «пр») и передающей (индекс «пер») антенн соответственно.

Поскольку измерение амплитудной ДН выполняется для фиксированного положения приемной антенны, в этом случае справедливо соотношение

$$D_{\text{пр}}(\omega, \Theta_1, \varphi_1) = D_{\text{max}},$$

где  $D_{\text{max}}$  — максимальное значение коэффициента направленного действия (КНД) приемной антенны.

В случае измерения зависимости КНД либо коэффициента усиления передающей антенны от частоты необходимо учитывать известное заранее изменение произведения КПД, коэффициентов отражения приемного и передающего трактов и КНД приемной антенны в рабочей полосе частот.

Очевидно, что на схеме рис. 1 самыми дорогостоящими элементами являются перестраиваемый, в общем случае, СВЧ-генератор регулируемой мощности и измеритель уровня сигнала или напряженности поля в точке приема. В связи с этим предлагается в качестве СВЧ-генератора калиброванной мощности использовать стандартный WiFi-маршрутизатор с коаксиальным выходом, т. е. с возможностью подключения внешней антенны. Любой сертифицированный роутер стандарта 802.11n диапазона 2,4 ГГц, вне зависимости от производителя, обладает следующими параметрами: выходная мощность в диапазоне 20–100 мВт,

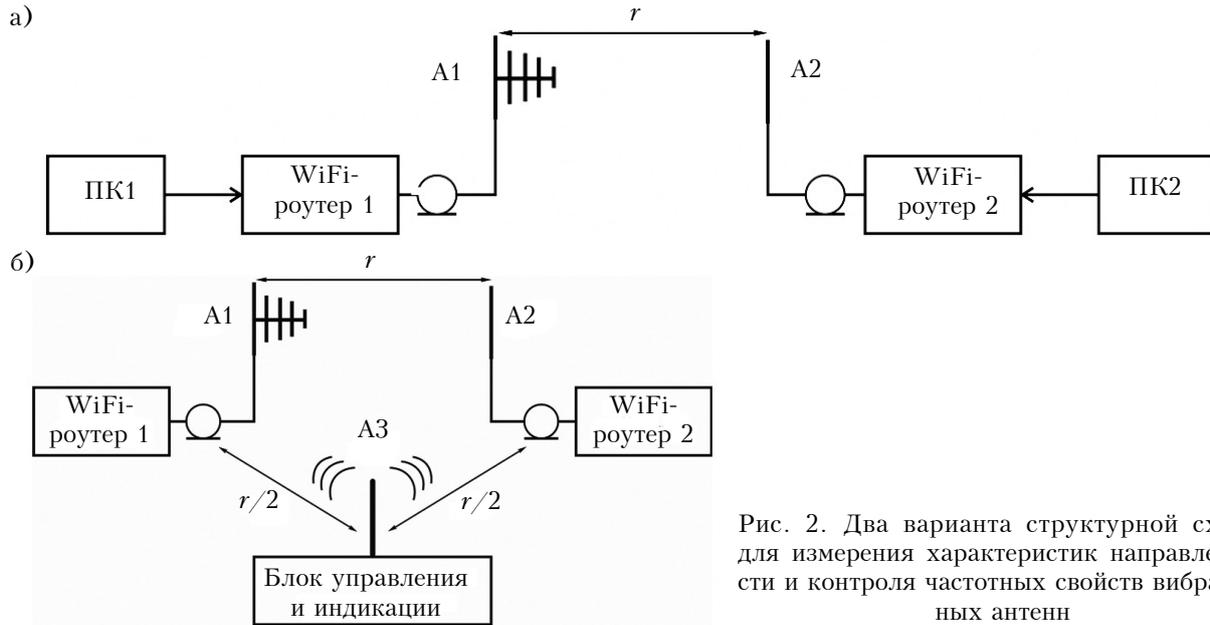


Рис. 2. Два варианта структурной схемы для измерения характеристик направленности и контроля частотных свойств вибраторных антенн

чувствительность приемника 80–85 дБм, динамический диапазон приемника 90 дБм. С помощью системных настроек маршрутизатора можно оперативно изменять такие параметры, как частота (в диапазоне 2400–2483,5 МГц с шагом 5–20 МГц), мощность передатчика (20–100 мВт) и т. д.

Следует отметить, что WiFi-роутер является приемо-передатчиком, а следовательно, содержит на аппаратном уровне инструментарий, позволяющий оценить параметры принимаемого сигнала. Уровень принимаемого сигнала также доступен пользователю из меню системных настроек.

На рис. 2 представлены два варианта схемы измерения диаграммы направленности и частотной характеристики антенны. Управление параметрами и считывание настроек передающей и приемной частей можно осуществлять как в режиме проводного подключения к маршрутизаторам, так и в режиме беспроводного удаленного доступа. В первом случае (рис. 2, а) необходимо наличие двух персональных компьютеров (ПК), а во втором (рис. 2, б) достаточно только одного управляющего устройства, снабженного модулем беспроводного доступа.

Рассмотрим алгоритм проведения измерения частотной характеристики в соответствии со схемой на рис. 2, а на примере направленной внешней директорной антенны типа «волновой канал», предназначенной для работы в WiFi-диапазоне.

Перед началом измерений необходимо обеспечить доступ к параметрам роутеров в браузере управляющего компьютера, введя адреса WiFi-роутеров: 192.168.1.1 для первого и 192.168.1.254 для второго, настроенного в режиме повторителя (repeater). Далее на ПК1 назначается ip-адрес класса С, например

192.168.1.100, после чего с помощью Web-браузера открывается доступ к системным настройкам маршрутизатора путем ввода в адресной строке браузера ip-адреса первого роутера 192.168.1.1 (при необходимости также вводятся логин и пароль). Затем то же самое выполняется для ПК2: назначается ip-адрес класса С, например 192.168.1.101, и в адресной строке вводится ip-адрес второго роутера 192.168.1.254. После этого система готова к проведению измерений. Далее выполняется согласование динамических диапазонов приемного устройства и входного сигнала путем подбора излучаемой мощности передатчика первого WiFi-роутера, которая изменяется в диапазоне от 10 до 100% от максимальной мощности. Измерения уровня принимаемого сигнала проводятся на каждой частоте (с помощью ПК2). При этом после каждой смены уровня мощности и при переходе с одной частоты на другую в процессе измерения ЧХ необходимо выполнять команду «Применить» для сохранения настройки. Изменение частоты приемника второго WiFi-роутера необходимо выполнять (с помощью ПК2) синхронно с изменением частоты передатчика на первом WiFi-роутере (с помощью ПК1).

Пример меню настроек роутера Asus RT-G32 показан на рис. 3.

Для измерения диаграммы направленности на передатчике и приемнике устанавливается частота, соответствующая максимальному значению уровня принимаемого сигнала, определенному по результатам измерения ЧХ. Значения уровня принимаемого сигнала фиксируются после каждого поворота передающей антенны A1 в азимутальной плоскости на заданный угол.

На рис. 4 приведен пример полученных описанным образом характеристик семиэлементной

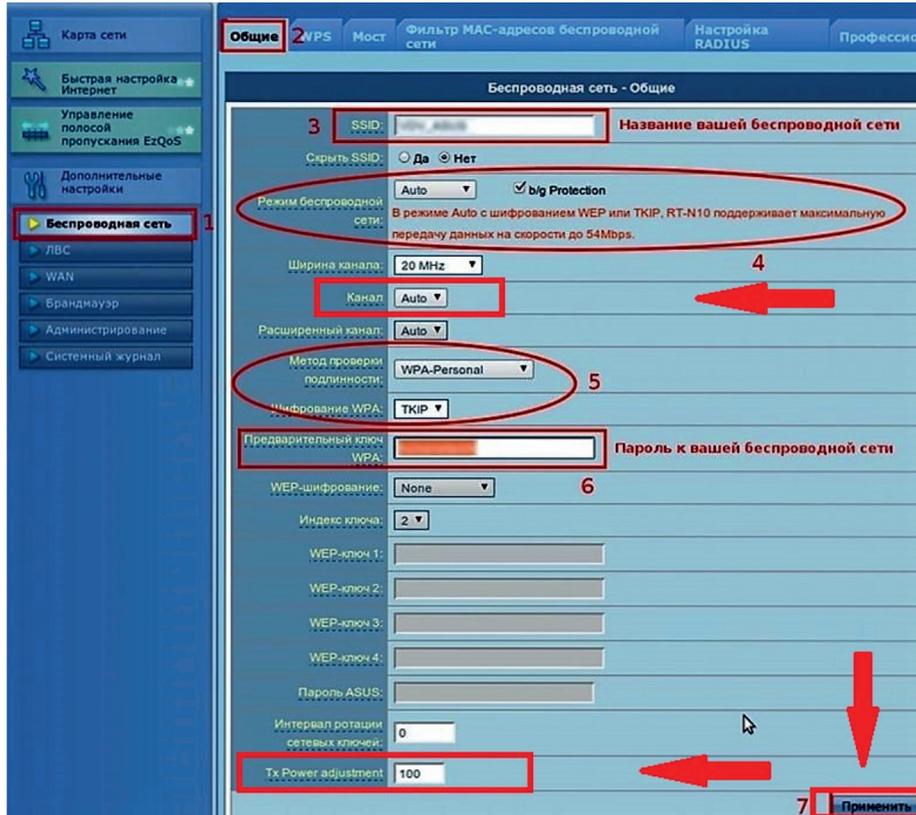


Рис. 3. Пример меню настроек роутера Asus RT-G32 (обведены поля, которые предназначены для настройки доступа в сеть Интернет и параметры в которых не должны изменяться в процессе измерений; стрелки показывают поля с изменяемыми параметрами)

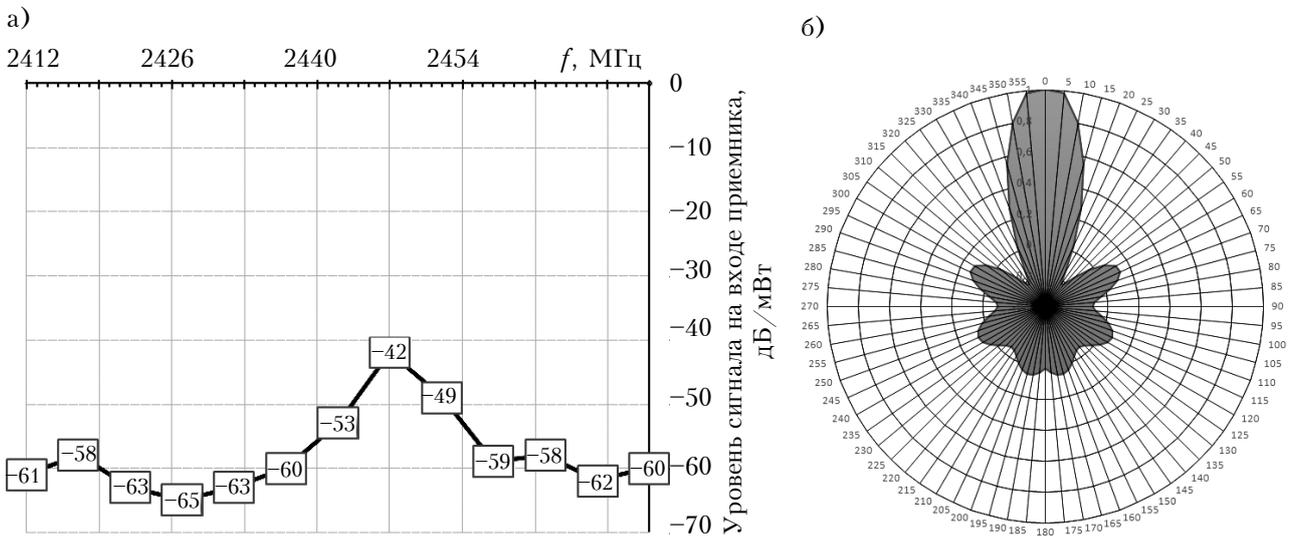


Рис. 4. Пример измеренных характеристик семиэлементной антенны типа «волновой канал» с центральной частотой 2450 МГц:  
 а – частотная характеристика, на которой указаны значения уровня сигнала на входе приемника в дБ/мВт;  
 б – диаграмма направленности по мощности

антенны типа «волновой канал», рассчитанной на центральную частоту 2450 МГц.

Измерения в соответствии со схемой на рис. 2, б проводятся аналогично, однако с удаленного компьютера осуществляется дистанци-

онный поочередный контроль маршрутизатора как передающей, так и приемной части.

Следует отметить, что с помощью многочисленных кроссплатформенных конструкторов приложений (например, QT-Creator, Google App

Inventor и др.) легко разработать мобильное приложение под Android, Windows или IOS, которое позволит пользователю провести автоматическое измерение частотной характеристики исследуемой антенны при помощи мобильного телефона, планшетного либо стационарного ПК с WiFi-модулем.

### Заключение

Предложенная упрощенная методика измерения диаграммы направленности и частотной характеристики антенн ISM-диапазона с использованием WiFi-маршрутизаторов позволяет существенно сократить время и финансовые затраты при развертывании беспроводных сетей. Благодаря тому, что маршрутизаторы различных фирм имеют сертифицированные характеристики, очевидно, что предложенная методика обеспечит хорошую повторяемость результатов на WiFi-роутерах различных моделей.

Данная методика может быть успешно использована при тестировании городских систем беспроводного видеонаблюдения и общественных точек доступа к локальным и глобальным ресурсам городской сети.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — Москва: Техносфера, 2006.
2. Росс Джон. Wi-Fi. Беспроводная сеть. — Москва: ИТ Пресс, 2007.
3. Авдеев В.Б., Катруша А.Н. Расчет коэффициента ослабления побочных электромагнитных излучений // Специальная техника. — 2013. — № 2. — С. 18–27.
4. Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д.И. Воскресенского. — Москва: Радиотехника, 2006.
5. Садченко А. В., Кушниренко О. А., Альхамиди М. Т., Алхадиди А. М. Метод измерения амплитудной диаграммы направленности зеркальных параболических антенн в звуковом диапазоне частот. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2016. — № 1. — С. 8–11. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2016.1.08>
6. Горбунова А.А., Коновалюк М.А., Баев А.Б., Кузнецов Ю.В. Модель электромагнитных излучений проводных интерфейсов передачи данных средств вычислительной техники // Специальная техника. — 2013. — № 5. — С. 26–36.
7. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Характеристики антенн в режиме передачи. Слабонаправленные антенны. — Москва: Изд-во МАИ, 1993.

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 18.10 2016 г.*

*А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО, І. В. ЦЕВУХ, І. А. ВАЛЯНСЬКИЙ, Ю. С. ЧІХРАЙ*

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

## ВИМІРЮВАННЯ АМПЛІТУДНОЇ ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНОСТІ І ЧАСТОТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕН ISM-ДІАПАЗОНУ ЗА ДОПОМОГОЮ WiFi-МАРШРУТИЗАТОРІВ

*Запропоновано методику вимірювання частотної характеристики і діаграми спрямованості антен, призначених для бездротового доступу в діапазоні частот 2,4 ГГц з використанням трансивера WiFi-маршрутизаторів. Наведено результати лабораторного вимірювання амплітудної діаграми спрямованості і частотної характеристики семиеlementної антени типу «хвильовий канал».*

*Ключові слова: WiFi-маршрутизатор, генератор НВЧ, діаграма спрямованості, коефіцієнт спрямованої дії.*

DOI: 10.15222/ТКЕА2016.6.40  
UDC 621.396.66

*A. V. SADCHENKO, O. A. KUSHNIRENKO,  
I. V. TSEVUKH, I. A. VALYANSKII,  
Yu. S. CHIKHRAI  
Ukraine, Odessa national polytechnic university  
E-mail: anjand@mail.ru, kuuk@mail.ru*

## MEASUREMENT OF THE AMPLITUDE PATTERN AND THE FREQUENCY CHARACTERISTIC OF ISM-BAND ANTENNAS USING WiFi ROUTERS

*The quality of wireless network depends essentially on the directional characteristics of the antennas, the most important of which are the amplitude radiation pattern (RP) and the frequency response (FR), which is understood as a change of the gain coefficient in the working frequency band. At the same time, equipment for measuring the characteristics of the antennas in real conditions is very expensive, difficult to deploy, configure and maintain. In most cases, the measurement accuracy requirements are significantly lower than in laboratory measurements. This fact allows using the equipment which is part of the wireless network itself. The aim of this work is to develop a simplified procedure for measuring the amplitude RP and frequency characteristics of antennas for the rapid assessment of electromagnetic environment during deployment of wireless networks, when the requirements for measurement accuracy are not critical.*

*In this article we propose to use as a UHF calibrated power generator a standard Wi-Fi router with a coaxial output, i.e. with the possibility to connect an external antenna. Certified routers 802.11n standard of 2.4 GHz band, regardless of the manufacturer, provide the following parameters: output power range of 20–100 mW,*

receiver sensitivity of 80–85 dBm, dynamic range of the receiver – 90 dBm. Using system settings of the router allows one to rapidly change the frequency in the range of 2400–2483,5 MHz with a step of 5–20 MHz.

The practical value of the proposed methodology for measuring Wi-Fi antennas characteristics consists in substantial saving of time and costs during deployment and adjusting of wireless networks. This method can be successfully used for testing city wireless video surveillance systems and public access points to the local and global resources of city network.

**Keywords:** Wi-Fi router, microwave generator, radiation pattern, directivity factor.

REFERENCES

1. Shakhnovich I. *Sovremennye tekhnologii besprovodnoi svyazi* [Modern wireless technology]. Moscow, Tekhnosfera, 2006, 288 p. (Rus)  
 2. John Ross. *The Book of WI-FI: Install, Configure, and Use 802.11b Wireless Networking*. No Starch Press San Francisco, CA, USA, 2003. ISBN:188641145X  
 3. Avdeev V.B., Katrusha A.N. *Spetsial'naya tekhnika*, ISSN 1996-0506, 2013, no 2, pp. 18-27. (Rus)  
 4. *Ustroistva SVCh i anteny* [Microwave devices and antennas]. Ed. by D.I. Voskresenskii, Moscow, Radiotekhnika, 2006, 375 p. (Rus)

5. Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Al'khamidi M. T., Alkhadi A. M. [Method of measuring the amplitude directivity pattern of parabolic mirrored antennas in the audio frequency range]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2016, no. 1, pp. 8-11. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2016.1.08> (Rus)  
 6. Gorbunova A.A., Konovalyuk M.A., Baev A.B., Kuznetsov Yu.V. *Spetsial'naya tekhnika*, ISSN 1996-0506, 2013, no. 5, pp. 26-36. (Rus)  
 7. Voskresenskii D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., Ponomarev L.I. [*Kharakteristiki anteny v rezhime peredachi. Slabonapravlennoye anteny*]. Moscow, MAI, 1993, 76 p. (Rus)

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

*Бондаренко Юлия Валерьевна*, канд. тех. наук, доцент, Донбасский государственный технический университет, г. Лисичанск

*Глушеченко Эдуард Николаевич*, канд. техн. наук, начальник отдела, НПП «Сатурн», г. Киев

*Добровольский Юрий Георгиевич*, канд. техн. наук, начальник научно-аналитического отдела ООО «Научно-производственная фирма «Тензор», г. Черновцы

*Должиков Владимир Васильевич*, докт. физ.-мат. наук, зав. кафедрой, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

*Коваленко А. В.*, докт. физ.-мат. наук, зав. кафедрой, Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара

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

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

*Рюхтин Вячеслав Васильевич*, канд. техн. наук, зам. председателя правления по научной работе ЦКБ «Ритм», г. Черновцы

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

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

1. К рассмотрению принимаются статьи прикладной направленности на русском, украинском или английском языке, которые не были опубликованы ранее и не переданы для публикации в другие издания.

2. В журнале публикуются научно-практические и экспериментальные работы по следующим тематическим направлениям:

- Современные электронные технологии;
- Новые компоненты для электронной аппаратуры;
- Электронные средства: исследования, разработки;
- СВЧ-техника;
- Системы передачи и обработки сигналов;
- Микропроцессорные устройства и системы;
- Энергетическая электроника;
- Полупроводниковая светотехника;
- Биомедицинская электроника;
- Сенсоэлектроника;
- Функциональная микро- и наноэлектроника;
- Обеспечение тепловых режимов;
- Технологические процессы и оборудование;
- Материалы электроники;
- Метрология. Стандартизация.

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.

6. Обязательным условием для принятия статьи к печати является ее соответствие общепринятым нормам построения научной публикации, то есть наличие в ней:

- постановки проблемы в общем виде с указанием ее связи с важными научными или практическими задачами;
- анализа последних достижений и публикаций, в которых рассматривается описанная проблема, с выделением той ее части, решению которой посвящена данная статья;
- цели статьи (постановки задачи);
- основного материала с обсуждением и интерпретацией полученных результатов;
- выводов, а также указания на перспективы проведения исследований в данном направлении.

Кроме этого, при оценке рукописи редакцию будут интересовать следующие аспекты:

- возможность практического применения;
- целесообразность таблиц, иллюстраций, списка использованных источников;

- строгость терминологии;
- композиция рукописи, в т. ч. оправданность объема.

7. Статья должна быть четко структурирована, а поставленная задача, выводы и название — согласованы между собой.

8. При написании статьи следует обратить внимание на следующее:

- название рукописи должно быть конкретным, информативным и в то же время по возможности кратким;
- аннотация должна быть достаточно лаконичной (от 50 до 100 слов) и в то же время информативной, соответствовать содержанию статьи и показывать, что сделано в работе;
- ключевые слова должны быть подобраны так, чтобы вероятность нахождения статьи через поисковые системы была как можно выше;
- описание результатов, представленных на рисунках, должно включать в себя интерпретацию этой информации, а не сводиться к дублированию подрисовочных подписей или к простому описанию приведенных зависимостей. Например, вместо таких неинформативных фраз, как «На рис. 1 приведен график зависимости  $A$  от  $B$ . Из рисунка видно, что при возрастании  $B$  значение  $A$  монотонно уменьшается.», следует дать пояснение типа «Как видно из рис. 1, при возрастании  $B$  значение  $A$  монотонно уменьшается, что свидетельствует о том, что ...»;
- выводы (заключение) не должны повторять аннотацию — в них нужно привести результаты работы (а не краткое содержание статьи). Правильно сформулировать выводы помогут такие фразы, как «Проведенное исследование показало, что ...», «Разработанная методика позволяет ...», «Авторами установлено, что...» и др.

9. Список «Использованные источники» (образец см. на сайте) формируется в порядке их упоминания в тексте. При этом нужно иметь в виду следующее:

- обязательно наличие ссылок на статьи и монографии последних лет, в том числе зарубежных авторов;
- не рекомендуется включать в список литературы ссылки на такие нормативные документы, как указы, акты и т. п. — если без этого нельзя обойтись, лучше упомянуть их непосредственно в тексте статьи;
- желательно избегать ссылок на труднодоступные публикации или на недолговечные Интернет-источники;
- при ссылке в тексте на численные значения, формулы и иные фактические данные, заимствованные из книг, следует указывать не только саму книгу, но и страницу (например, [2, с. 418]);

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. Как правило, публикации в «ТКЭА» занимают от двух до шести журнальных страниц, что соответствует 5–15 страницам, набранным в

текстовом редакторе Microsoft Word, шрифт Times New Roman, размер 12, междустрочный интервал 1,5.

12. При наборе текста статьи использование программ типа MathType допускается только в тех случаях, когда Word бессилен, например при наборе специальных знаков над буквенными обозначениями, подкоренных выражений, пределов интегрирования, суммирования и т. п.

13. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а терминология соответствовать общепринятой. Все использованные символы и аббревиатуры нужно пояснить при первом их упоминании в тексте.

14. С точки зрения удобства верстки желательно, чтобы объем иллюстраций не превышал 40% от общего объема статьи.

15. В начале статьи, кроме ее названия и информации об авторах (ФИО, ученые степени, место работы, e-mail), необходимо указать ее индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК).

16. Материалы статьи направляются по e-mail <tkea@optima.com.ua>. В тексте письма нужно указать ФИО авторов, название статьи и соответствующее тематическое направление (см. п. 2), а к письму прикрепить подписанные Авторское соглашение и Карточки автора (см. на сайте).

17. При цитировании статей из журнала «ТКЭА» его название на латинице должно быть представлено транслитерацией, а именно: «Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature».

P.S. Для контроля выполнения требований к содержанию статьи авторы могут воспользоваться критериями, по которым рукопись будет оцениваться рецензентом (см. бланк рецензии на сайте).

---



ВОСЕМНАДЦАТА  
МЕЖДУНАРОДНА  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКА КОНФЕРЕНЦИЯ



## СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

22 – 26 мая 2017 года  
Украина, г. Одесса

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

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



22.05–26.05.2017  
Одеса, ОНПУ

ОРГАНИЗАТОРЫ:



Одеський  
національний  
політехнічний  
університет  
(Україна)



Hochschule für Technik  
und Wirtschaft Berlin  
(Германия)

У УКРАЇНСЬКО-НІМЕЦЬКА  
КОНФЕРЕНЦІЯ

# ІНФОРМАТИКА. КУЛЬТУРА. ТЕХНІКА

<http://ict.opu.ua>  
[info.ics.onpu@gmail.com](mailto:info.ics.onpu@gmail.com)

Номер готовили  
Днепр, Киев, Львов, Одесса,  
Харьков, Черновцы



Пишите  
Подписывайтесь  
Читайте

6 2016

НОЯБРЬ – ДЕКАБРЬ