

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



К статье
«Одеський національний політехнічний університет
(до 100-річного ювілею)»

2 2018

МАРТ — АПРЕЛЬ

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

ISSN 2225-5818

Выходит один раз в 2 месяца

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К. т. н. А. Ф. Бондаренко
(КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Акад. НАНУ, д. ф.-м. н. А. Е. Беляев (г. Киев, Украина)
Д. т. н. Н. М. Вакив (г. Львов, Украина)
Д. т. н. Г. А. Оборский (г. Одесса, Украина)
К. т. н. В. М. Чмилъ В. (г. Киев, Украина)
Е. А. Тихонова (г. Одесса, Украина)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д. т. н. С. Г. Антощук (г. Одесса, Украина)
Д. т. н. А. П. Бондарев (г. Львов, Украина)
Prof. I. Vajda (Budapest, Hungary)
Prof. D. Vinnikov (Tallinn, Estonia)
Prof. I. Galkin (Riga, Latvia)
К. т. н. Э. Н. Глушеченко (г. Киев, Украина),
зам. главного редактора
К. т. н. Г. Г. Горох (г. Минск, Республика Беларусь)
Prof. K. Dhoska (Tirana, Albania)
Д. ф.-м. н. В. В. Должиков (г. Харьков, Украина)
Д. т. н. А. А. Дружинин (г. Львов, Украина)
Д. т. н. А. А. Ефименко (г. Одесса, Украина),
зам. главного редактора
Д. ф.-м. н. Д. В. Корбутяк (г. Киев, Украина)
Д. т. н. С. И. Круковский (г. Львов, Украина)
Д. т. н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург, Российская
Федерация)
Чл.-кор. НАНУ, д. ф.-м. н. В. С. Лысенко (г. Киев,
Украина)

Prof. J. Martins (Caparica, Portugal)
Д. т. н. И. Ш. Невлюгов (г. Харьков, Украина)
Dr. Sc. D. Nika (Chisinau, Moldova)
Д. т. н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев, Украина)
Prof. V. Pires (Setúbal, Portugal)
Д. ф.-м. н. С. В. Плаксин (г. Днепропетровск,
Украина)
К. т. н. Проконец В. М. (г. Киев, Украина)
Prof. E. Romero-Cadaval (Badajoz, Spain)
К. ф.-м. н. А. В. Рыбка (г. Харьков, Украина)
К. т. н. П. С. Сафронов (г. Одесса, Украина),
отв. секретарь редколлегии
Д. т. н. В. Н. Сигорец (г. Киев, Украина)
Д. т. н. В. С. Ситников (г. Одесса, Украина)
Dr. Sc. Z. Stević (Belgrade, Serbia)
Д. х. н. В. Н. Томашик (г. Киев, Украина)
К. т. н. В. Е. Трофимов (г. Одесса, Украина)

Подписка на журнал

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

В редакции «ТКЭА» можно подписаться с любого номера.

Контактная информация

Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17;
tkea@optima.com.ua, www.tkea.com.ua,
+38 (048)728-18-50, 728-49-46.

Редакция

Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко, П. С. Сафронов,
А. А. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова, Е. И. Корецкая.

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

Реферируется
в УРЖ «Джерело»
(г. Киев)

Журнал 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,
в базу данных DOAJ,
в Google Scholar

Номер выпущен при поддержке
ОНПУ (г. Одесса),
НПП «Сатурн» (г. Киев),
НПП «Карат» (г. Львов)

Одобрено к печати
Ученым советом ОНПУ
(Протокол № 8 от 24.04 2018 г.)
Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

УЧРЕДИТЕЛИ

Институт физики полупровод-
ников им. В. Е. Лашкарёва
Научно-производственное
предприятие «Сатурн»
Одесский национальный
политехнический университет
Издательство «Политехпериодика»

Свидетельство о регистрации
№ KB 21788-11688ПР
от 21.12.2015 г

СОДЕРЖАНИЕ

Новые компоненты для электронной аппаратуры

Фотоконденсатор на основе нанокompозита $n\text{-InSe}/\text{RbNO}_3$. В. В. Нетяга, В. Н. Водопьянов, В. И. Иванов, И. Г. Ткачук, З. Д. Ковалюк 3

Системы передачи и обработки сигналов

Чувствительность матриц ПЗС с электронным умножением. Ф. Ф. Сизов, А. Г. Голенков, В. П. Рева, В. В. Забудский, С. В. Коринец, А. М. Торчинский 9

Гибридный подход к энергоэффективной кластеризации для гетерогенных беспроводных сенсорных сетей. Ш. Ш. Бхушан, С. Г. Антощук (на английском) 15

Микропроцессорные устройства и системы

Метод экспертного выбора цифровых компонентов систем промышленной автоматики на основе марковской модели. В.А. Болтенков, В.И. Куваева, П.П. Червоненко 21

Технологические процессы и оборудование

Улучшение параметров кремниевого варикапа при использовании лазерного геттерирования. И. М. Викулин, В. Н. Литвиненко, С. В. Шутов, А. И. Марончук, А. Н. Деменский (на английском) 29

Обеспечение тепловых режимов

CAD/CAE-метод решения гидродинамической задачи при разработке мощных электронных приборов. В. Е. Трофимов, А. Л. Павлов, Я. Г. Мамыкин (на английском) 33

Метрология. Стандартизация

Определение количества запасных элементов технических систем по частоте отказов. А. Н. Тыныныка 42

К истории науки и техники

Одесский национальный политехнический университет (к 100-летию юбилею). Г. О. Оборский, В. С. Шобик (на украинском) 46

Список рецензентов номера 48

ЗМІСТ

Нові компоненти для електронної апаратури

Фотоконденсатор на основі нанокompозиту $n\text{-InSe} < \text{RbNO}_3 >$. В. В. Нетяга, В. М. Водоп'янов, В. І. Іванов, І. Г. Ткачук, З. Д. Ковалюк (3)

Системи передачі та обробки сигналів

Чутливість матриць ПЗЗ із електронним множенням. Ф. Ф. Сизов, О. Г. Голєнков, В. П. Рева, В. В. Забудський, С. В. Корінець, А. М. Торчинський (9)

Гібридний підхід до енергоефективної кластеризації для гетерогенної бездротової сенсорної мережі. Ш. Ш. Бхушан, С. Г. Антошук (15)

Мікропроцесорні пристрої і системи

Метод експертного вибору цифрових компонентів систем промислової автоматики на основі марківської моделі. В. О. Болтєнков, В. І. Куваєва, П. П. Червоненко (21)

Технологічні процеси та обладнання

Поліпшення параметрів кремнієвих варикапів при використанні лазерного гетерування. І. М. Вікулін, В. М. Литвиненко, С. В. Шутов, О. І. Марончук, О. М. Деменський (29)

Забезпечення теплових режимів

CAD/CAE-метод вирішення гідродинамічної задачі при розробці потужних електронних приладів. В. Є. Трофімов, А. Л. Павлов, Я. Г. Мамікин (33)

Метрологія. Стандартизація

Визначення кількості запасних елементів за частотою відмов. О. М. Тининика (42)

До історії науки і техніки

Одеський національний політехнічний університет (до 100 річного ювілею). Г. О. Оборський, В. С. Шобік (46)

CONTENTS

New components for electronic equipment

Photocapacitor based on nanocomposite $n\text{-InSe} < \text{RbNO}_3 >$. V. V. Netyaga, V. N. Vodop'yanov, V. I. Ivanov, I. G. Tkachyuk, Z. D. Kovalyuk (3)

Signals transfer and processing systems

Sensitivity of CCD matrices with electronic multiplication. V. P. Reva, , S. V. Korinets, A. G. Golenkov, S. V. Sapon, A. M. Torchinsky, V. V. Zabudsky, F. F. Sizov (9)

A hybrid approach to energy efficient clustering for heterogeneous wireless sensor network. S. Bhushan, S. Antoshchuk (15)

Microprocessor-based devices and systems

Method for expert choice of industrial automation digital components on the basis of Markov's model. V. A. Boltenev, V. I. Kuvaieva, P. P. Chervonenko (21)

Production technology and equipment

Enhancing parameters of silicon varicaps using laser gettering. I. M. Vikulin, V. N. Litvinenko, S. V. Shutov, A. I. Maronchuk, A. N. Demenskiy (29)

Thermal management

CAD/CAE method of solving the hydrodynamic problem while developing powerful electronic devices. V. E. Trofimov, A. L. Pavlov, Y. G. Mamykin (33)

Metrology, standardization

Computation of quantity of spare parts by the failure frequency. A. N. Tynynyka (42)

On the history of science and engineering

Odessa National Polytechnic University (on the occasion of the centenary). G. O. Oborsky, V. S. Shobik (46)

К. ф.-м. н. В. В. НЕТЯГА, к. ф.-м. н. В. Н. ВОДОПЬЯНОВ, к. ф.-м. н. В. И. ИВАНОВ,
И. Г. ТКАЧУК, д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК

Украина, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Черновицкое отделение
E-mail: chimsp@ukrpost.ua

ФОТОКОНДЕНСАТОР НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИТА $n\text{-InSe}<\text{RbNO}_3>$

На основе слоистого полупроводника $n\text{-InSe}$ и сегнетоэлектрической соли RbNO_3 синтезирован новый наноккомпозит $n\text{-InSe}<\text{RbNO}_3>$. Полученное соединение отличается высоким коэффициентом перекрытия по емкости при освещении и обладает способностью накапливать электрический заряд. На его основе разработан фотоконденсатор, работоспособный в области частот от 10^{-1} до 10^4 Гц, для применения в оптоэлектронных системах памяти, в фотоэлектрических сенсорах, в преобразователях световой энергии и в накопителях электрической энергии.

Ключевые слова: фотоконденсатор, интеркаляция, полупроводник A^3B^6 , сегнетоэлектрик, наноккомпозит.

Известные в наше время гибридные структуры [1], в которых используется возможность генерации неравновесных фотоносителей в полупроводнике для зарядки двойного электрического слоя на границе между полупроводником и ионным проводником, созданы на основе контакта твердотельного слоистого полупроводника с жидким электролитом [2–4] или с твердой ионной солью [5]. Процессы, которые происходят в них при освещении, обусловлены протеканием тока в жидком электролите и в полупроводнике. Медленный транспорт ионов в жидком электролите обуславливает низкую частоту перезарядки электрического двойного слоя. Жидкий электролит создает сложность герметизации таких приборов и делает невозможным их использование в гибридных твердотельных нанокэлектронных устройствах. Принцип действия фотоварикапов, известных твердотельных полупроводниковых фотоэлектрических структур МДП (металл — диэлектрик — полупроводник), основан на изменении емкости в области пространственного заряда этих барьерных структур при их освещении [6]. Фоточувствительность варикапов зависит от поверхностной рекомбинации и поверхностных центров прилипания неравновесных (возбужденных в полупроводнике светом) носителей заряда. Эти устройства применяются в области частот 10^4 – 10^5 Гц как элементы оптоэлектронных модуляторов напряжения, элементов регулируемых резонансных систем, они характеризуются низкими значениями удельной электрической емкости и не применяются в низкочастотной области (меньше чем 10^2 Гц), которая является важной для функционирования преобразователей солнечной энергии.

Наиболее близким по технической сути к разработанному авторами фотоконденсатору является твердотельный полупроводниковый фотоварикап $\text{Ni} - \text{GeO} - \text{GaSe}$ [7], который характеризуется невысокими значениями удельной емкости и коэффициента перекрытия по емкости при освещении (отношение значений емкости структуры, измеренных при ее освещении и в темноте) при низких частотах электрического сигнала ($< 10^2$ Гц). Это связано с физической природой явлений, которые происходят в твердотельных полупроводниковых фотоварикапах и обуславливают изменение емкости структур при их освещении [7].

В данной работе представлена модель фотоконденсатора на основе слоистого полупроводникового монокристалла InSe , интеркалированного ионами сегнетоэлектрической соли RbNO_3 из ее расплава с высокой удельной электрической емкостью и большим коэффициентом перекрытия по освещению, работоспособного в частотном диапазоне 10^{-1} – 10^4 Гц.

Синтез композитного материала и конструкция фотоконденсатора

Полупроводниковые монокристаллы $n\text{-InSe}$ выращивались методом Бриджмена из нестехиометрической смеси компонентов ($\text{In}_{1.03}\text{Se}_{0.97}$). Для изготовления разработанных устройств использовались высокоомные монокристаллы InSe , которые имели кристаллическую структуру γ -политипа, n -тип проводимости с концентрацией электронов около 10^{15} см $^{-3}$ при комнатной температуре. Из больших слитков полученных монокристаллов механическим скалыванием вдоль

слоев отделялись пластинки размером $4 \times 4 \times 0,2$ мм. Полученный образец InSe помещался в фарфоровый тигель, химически инертный к расплавленному нитрату рубидия, и выдерживался в расплаве соли RbNO_3 при температуре 370°C , которая поддерживалась автоматически высокоточным регулятором с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Длительность процесса экспонирования составляла примерно 10 мин. После внедрения ионов соли в ван-дер-ваальсовы щели InSe образец охлаждался до комнатной температуры. Схема технологической установки для интеркаляции монокристаллов $n\text{-InSe}$ приведена в [8].

На верхнюю и нижнюю поверхности (0001) нанокompозитного материала термическим распылением в вакууме осаждался тонкий (толщиной несколько десятков нанометров) слой In, который имеет высокий коэффициент пропускания для падающих на эту поверхность фотонов в области фундаментального поглощения InSe ($h\nu > 1,3$ эВ). Поверхность, на которую будет падать свет, дополнительно покрывалась золотом. Токовые выводы подпаивались к базовым плоскостям (0001) нанокompозитного материала с помощью сплава In – Ga. Структура герметизировалась компаундом со всех сторон, кроме фронтальной плоскости. Конструкция фотоконденсатора схематически представлена на **рис. 1**.

Во время измерения емкости фотопреобразователь засвечивался немодулированным белым светом. Интегральная плотность светового потока на фронтальной поверхности структуры составляла около 200 мкВт/см^2 . Измерения комплексного электрического импеданса структур проводились в герметичном боксе в сухой атмосфере, осушенной P_2O_5 . Морфология сформированных на ван-дер-ваальсовой поверхности (0001) InSe наноструктур RbNO_3 контролировалась с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Nanoscope IIIa Dimension 3000 (Digital

Instrument) в режиме периодического контакта. Измерения проводились на воздухе после скалывания пластинок с образцов изготовленного нанокompозитного материала вдоль плоскостей (0001) InSe. Частотные характеристики емкости фотоконденсаторов измерялись при комнатной температуре в темноте и при освещении с помощью измерителя электрического импеданса Solartron FRA 1255. Дифрактограмма получена на установке ДРОН-2.0 (CuK_α -излучение).

Результаты исследований и их обсуждение

Из анализа результатов рентгеновских измерений полученных нанокompозитов следует, что интеркалированные образцы $\text{InSe} < \text{RbNO}_3 >$ сохраняют монокристаллическую структуру, а спектр рентгеновской дифрактограммы свидетельствует о вхождении интеркалянта в ван-дер-ваальсовы щели слоистого монокристалла InSe с увеличением параметра решетки c , равного $2,49641$ нм, и сохранением параметра $a = 0,40020$ нм. В качестве примера на **рис. 2** представлена рентгеновская дифрактограмма одного из исследованных образцов. Отсутствие дополнительных пиков свидетельствует о том, что полученный материал не содержит посторонних примесей.

На АСМ-изображениях поверхности слоев нанокompозитного образца, приведенных на **рис. 3**, видны островки RbNO_3 , которые формируют наноразмерные кольца. Высота островков не превышает ширины ван-дер-ваальсовой щели для InSe, которая составляет примерно $0,35$ нм, а средний внешний диаметр колец не превышает 50 нм. Ансамбль нанокольцев характеризуется высокой поверхностной плотностью ($10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-2}$) в плоскости (0001) слоев кристалла.

Высокая удельная емкость исследуемого образца (**рис. 4, таблица**) при освещении ($1 - 10^4 \text{ Ф/см}^2$), которая наблюдается в диапазоне частот от 10^{-1} до 10^3 Гц, связана с малой толщиной слоя Гельмгольца в твердотельных наноионных конденсаторах, встроенных в слоистую матрицу. В объеме нанокompозитного материала создается большое количество таких наноконденсаторов, которые вносят вклад в общую электрическую емкость кристалла.

При облучении нанокompозитного образца светом из области фундаментального поглощения InSe (c энергией фотонов $h\nu > 1,3$ эВ) за счет фотовозбужденных носителей в полупроводнике увеличивается концентрация электронов на гетерограницах между ионной солью и оксидом InO_x . При этом толщина слоя Гельмгольца, которая определяет емкость наноионного конденсатора, уменьшается за счет диффузионной составляющей [9], и емкость наноионного кон-

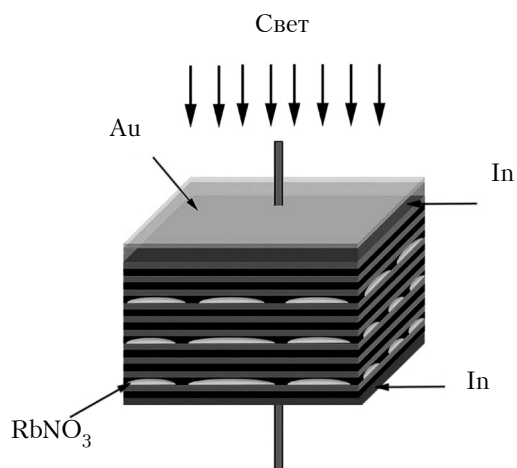


Рис. 1. Конструкция фотоконденсатора $n\text{-InSe} < \text{RbNO}_3 >$

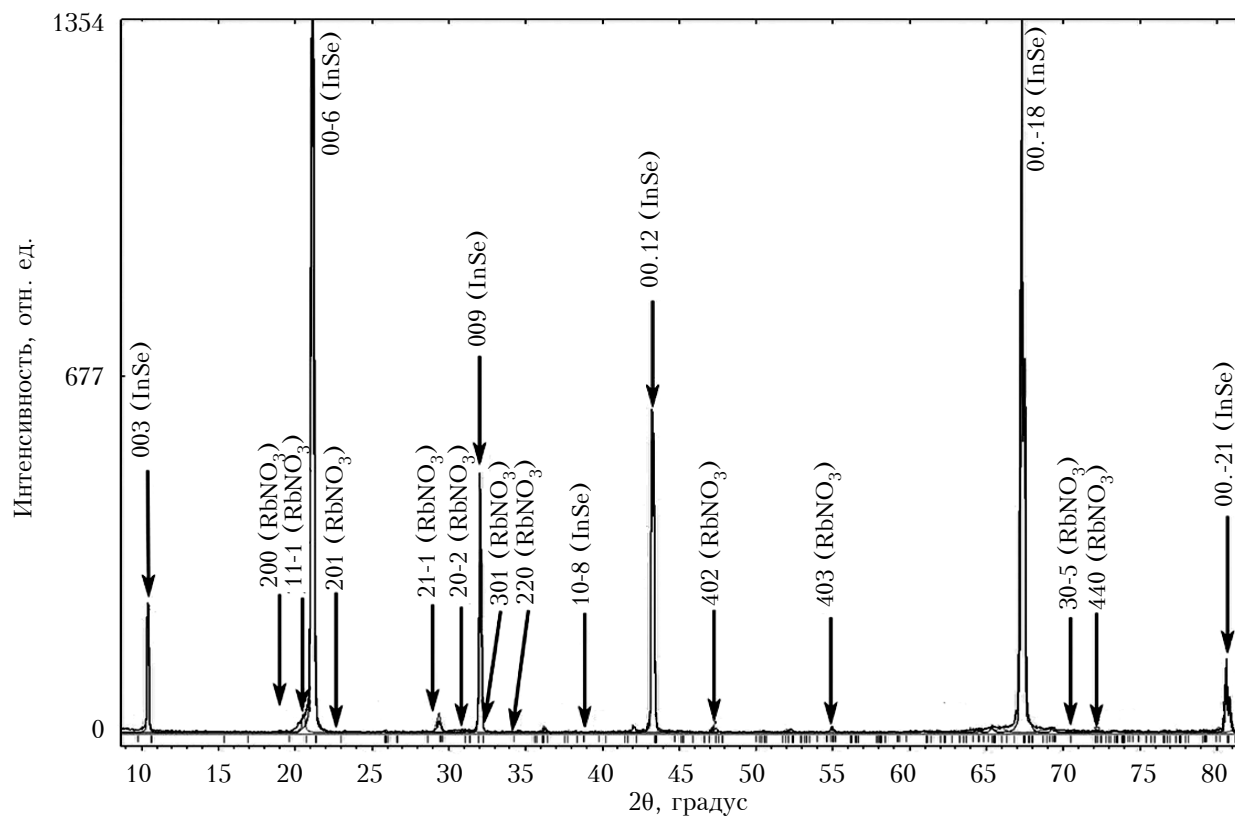


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма образца $\text{InSe}<\text{RbNO}_3>$, интеркалированного в расплаве RbNO_3 при температуре 370°C в течение 8 мин

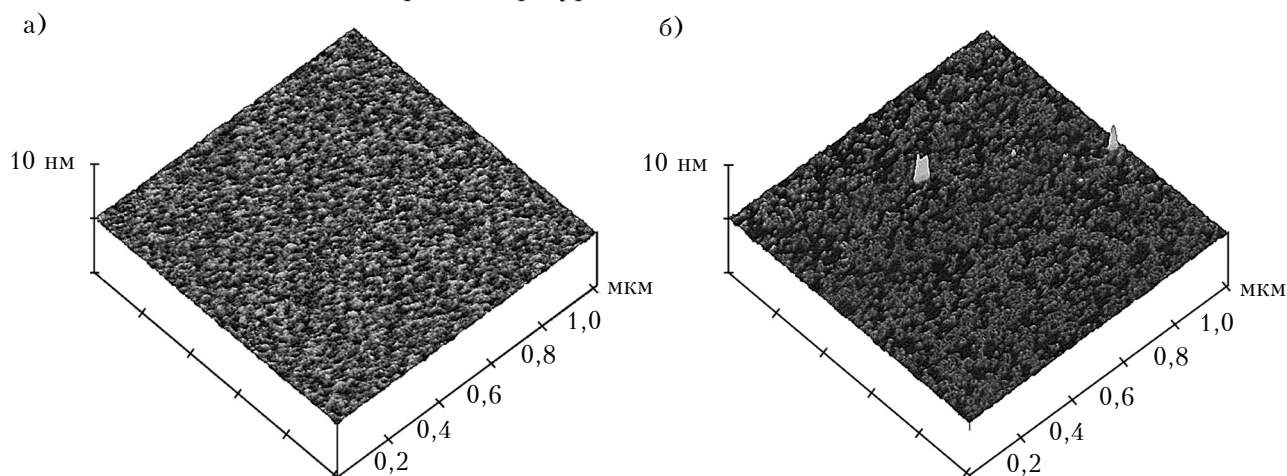


Рис. 3. АСМ-изображение ван-дер-ваальсовой поверхности нанокompозитного образца $n\text{-InSe}<\text{RbNO}_3>$, синтезированного при температуре 370°C и длительности интеркаляции ионов соли 8 мин (а) и 16 мин (б)

денсатора сильно растет, что приводит к значительному увеличению напряженности электрического поля в области наноколлец.

Вертикальный транспорт возбужденных светом носителей вдоль кристаллографической оси c в чистых слоистых кристаллах определяется энергетическим барьером, связанным с дефектами их упаковки. В условиях сильного электрического поля, которое возникает при освещении нанокompозитного материала, электроны легко преодоле-

вают этот барьер, и электрическая проводимость материала вдоль оси c растет. В классических барьерных фотопреобразователях толщина базового слоя InSe не может быть больше нескольких микрон, что связано с малой диффузионной длиной неравновесных электронов в результате их значительной рекомбинации при вертикальном транспорте вдоль оси c кристалла [10]. В рассматриваемом образце ионная соль внедряется между слоями InSe в плоскостях, которые распо-

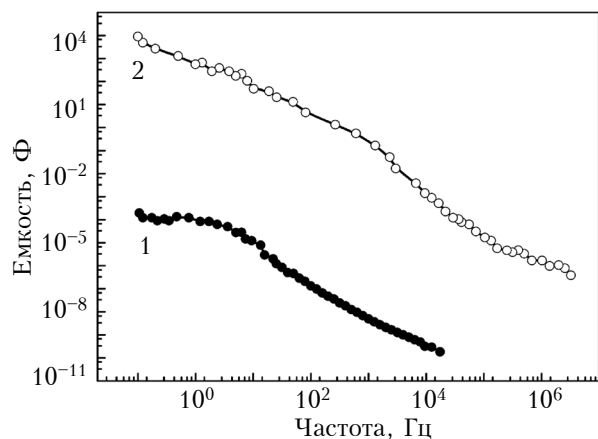


Рис. 4. Частотная зависимость электрической емкости фотоконденсатора на основе $\text{InSe}<\text{RbNO}_3>$ при $U_{\text{см}} = 8$ В в темноте (1) и при освещении (2)

Емкость фотоконденсатора на основе $n\text{-InSe}<\text{RbNO}_3>$ при $U_{\text{см}} = 8$ В

Частота, Гц	Емкость, Ф	Удельная емкость, $\text{Ф}/\text{см}^2$
10^{-1}	7000	$4,4 \cdot 10^4$
10^0	500	$3 \cdot 10^3$
10^1	60	$3,8 \cdot 10^2$
10^2	5	31
10^3	0,2	1,3

жены периодически вдоль этой оси на расстоянии l (десятки нанометров), что гораздо меньше диффузионной длины фотоносителей. При приложении к устройству постоянного напряжения $U_{\text{см}}$ наноионные конденсаторы, которые формируются в этих плоскостях, обеспечивают перенос электронов практически без рассеивания. При этом действительная часть комплексного импеданса $\text{InSe}<\text{RbNO}_3>$ при освещении не зависит от частоты в исследуемом частотном диапазоне (< 10 Гц). В предложенном устройстве неравновесные фотоносители в условиях сильного поля не успевают рекомбинировать и пролетают значительно большее расстояние вдоль оси c слоистого кристалла, чем это наблюдается в классических фотопреобразователях, изготовленных на основе InSe [9]. Это позволяет увеличить толщину базового слоя полупроводникового материала и обеспечить сильное поглощение света в кристалле InSe , который характеризуется невысоким по сравнению с другими полупроводниками коэффициентом оптического поглощения ($\approx 10^3 \text{ см}^{-1}$) в спектральной области

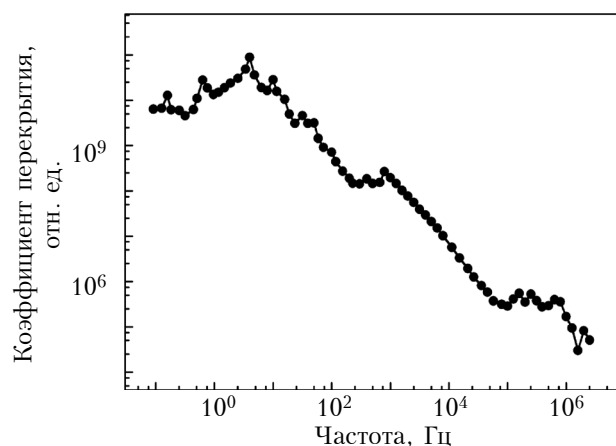


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента перекрытия по емкости фотоконденсатора на основе $n\text{-InSe}<\text{RbNO}_3>$ при освещении

$h\nu > 1,3$ эВ, то есть повысить эффективность фотопревращения и обеспечить высокий коэффициент перекрытия по емкости ($\approx 10^9$) при освещении (рис. 5).

Выводы

Таким образом, исследования показали возможность изготовления фотоконденсатора с высокой удельной емкостью на основе нового нанокompозитного материала $n\text{-InSe}<\text{RbNO}_3>$. Физические явления самоорганизации наноструктур с ионной проводимостью на поверхностях слоев InSe с молекулярным типом связи, которые используются при получении $n\text{-InSe}<\text{RbNO}_3>$, позволяют получать массивы наноразмерных 2D-включений с ионной проводимостью и с заданными геометрическими размерами, морфологией и пространственным распределением в матрице слоистого кристалла при низком уровне материальных затрат. Разработанный фотоконденсатор имеет высокую удельную электрическую емкость, большой коэффициент перекрытия по емкости при освещении, способен накапливать электрический заряд, он может быть использован в качестве низковольтного полупроводникового устройства в оптоэлектронных системах памяти, в фотоэлектрических сенсорах, в преобразователях световой энергии и в накопителях электрической энергии.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бахтинов А. П., Водопоьянов, В. Н., Ковалюк, З. Д. и др. Электрические свойства гибридных структур (ферромагнитный металл) — (слоистый полупроводник) $\text{Ni}/p\text{-GaSe}$ // ФТП. — 2010. — Т. 44, №. 2. — С. 180–193.
2. Божевольнов В. Б., Яфясов А. М., Коноров П. П. Формирование гетероструктур на основе соединений

кадмий-ртуть-теллур в системе полупроводник-электролит // Прикладная физика. — 2005. — Iss. 5. — С. 98—102.

3. Колбасов Г. Я., Городынский А. В. Процессы фотостимулированного переноса заряда в системе полупроводник-электролит. — Москва: Наука, 1993.

4. Schefold J., Vetter M. Solar energy conversion at the p-InP/vanadium^{3+/2+}semiconductor/electrolyte contact a study based on differential capacitance and current-voltage data // Journal of the Electrochemical Society. — 1994. — Vol. 141, N 8. — P. 2040—2048. — <https://dx.doi.org/10.1149/1.2055057>

5. Lee M. M., Teuscher J., Miyasaka T. et al. Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites // Science. — 2012. — Vol. 333, N 6107. — P. 643—647. — <https://dx.doi.org/10.1126/science.1228604>

6. Зуев В. А., Попов В. Г. Фотоэлектрические МДП-приборы. — Москва: Сов. радио, 1983.

7. Меджидов А. Б., Мурадов Р. М., Мехтиева С. И., Алиев И. М. Емкостные характеристики Ni-GeO-GaSe

структур при освещении // Изв. АН Азерб., сер. ФТМН. — 2003. — Т. 23, № 2. — С. 128—134.

8. Бахтінов А. П., Водоп'янов В. М., Ковалюк З. Д. та ін. Нові нанокompозитні сегнетоелектричні матеріали шаруваті кристали $n\text{-InSe}<\text{RbNO}_3>$ та $p\text{-GaSe}<\text{RbNO}_3>$ // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. — 2017. — Т. 15. — № 1. — С. 83—90.

9. Schimotani H., Asanuma H., Tsukazaki A. et al. Insulator-to-metal transition in ZnO by electric double layer gating // Appl. Phys. Lett. — 2007. — Vol. 91, N 8. — P. 082106(1)—082106(3). — <https://dx.doi.org/10.1063/1.2772781>

10. Segura A., Guesdon J.P., Besson J.M., Chevy A. Photoconductivity and photovoltaic effect in indium selenide // J. Appl. Phys. — 1983. — Vol. 54, N 2. — P. 876—888. — <https://dx.doi.org/10.1063/1.332050>

Дата поступления рукописи
в редакцию 23.03 2018 г.

В. В. НЕТЯГА, В. М. ВОДОП'ЯНОВ,
В. І. ІВАНОВ, І. Г. ТКАЧУК, З. Д. КОВАЛЮК

Україна, Інститут проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича НАН України,
Чернівецьке відділення
E-mail: chimsp@ukrpost.ua

ФОТОКОНДЕНСАТОР НА ОСНОВІ НАНОКОМПОЗИТУ $n\text{-InSe}<\text{RbNO}_3>$

Методом інтеркаляції іонів сегнетоелектричної солі RbNO_3 із її розплаву у шаруватий монокристал InSe отримано нанокompозитний матеріал $n\text{-InSe}<\text{RbNO}_3>$, який може бути використаний для виготовлення фотоконденсатора з високою питомою ємністю. Проведено рентгенівський аналіз структури, отримано АСМ-зображення поверхні шарів, виміряно діелектричні частотні характеристики зразків.

Встановлено, що інтеркальовані зразки $\text{InSe}<\text{RbNO}_3>$ зберігають монокристалічну структуру, а спектр рентгенівської дифрактограми свідчить про входження інтеркалянта в ван-дер-ваальсові щілини шаруватого монокристалу InSe зі збільшенням параметрів кристалічної решітки. На АСМ-зображеннях поверхні шарів нанокompозитного матеріалу спостерігаються островці RbNO_3 у вигляді нанорозмірних кілець. Висота островців не перевищує ширини ван-дер-ваальсової щілини для InSe , яка становить $\approx 0,35$ нм, а середній зовнішній діаметр кілець близько 50 нм.

Ансамбль нанокілець в площині (0001) шарів кристалу характеризується високою поверхневою щільністю ($10^9 - 10^{10}$ см⁻²). Таким чином, при виготовленні нанокompозитного матеріалу для запропонованого фотоконденсатора використовуються фізичні явища самоорганізації наноструктур з іонною провідністю на поверхнях шарів з молекулярним типом зв'язку. Це дозволяє отримувати масиви нанорозмірних 2D-включень з іонною провідністю і з заданими геометричними розмірами, морфологією і просторовим розподілом в матриці шаруватого кристалу.

Розроблений фотоконденсатор має високу питому електричну ємність, високий (близько 10^9) коефіцієнт перекриття по ємності при освітленні (відношення значень ємності структури, отриманих за освітлення та у темноті), здатний накопичувати електричний заряд, він може бути використаний як низьковольтний напівпровідниковий пристрій в оптоелектронних системах пам'яті, в фотоелектричних сенсорах, в перетворювачах світлової енергії і в накопичувачах електричної енергії.

Ключові слова: фотоконденсатор, інтеркаляція, напівпровідник A^3B^6 , сегнетоелектрик, нанокompозит.

DOI: 10.15222/TKEA2018.2.03
UDC 538.9

V. V. NETYAGA, V. N. VODOP'YANOV, V. I. IVANOV,
I. G. TKACHYUK, Z. D. KOVALYUK

Ukraine, Chernivtsi, I. M. Frantsevich Institute
for problems of materials science
of NAS of Ukraine, Chernivtsi department
E-mail: chimsp@ukrpost.ua

PHOTOCAPACITOR BASED ON NANOCOMPOSITE n -InSe $\langle$ RbNO₃ $\rangle$

The n -InSe $\langle$ RbNO₃ $\rangle$ nanocomposite material was obtained by the method of intercalation of the InSe layered single crystal from a melt of RbNO₃ ferroelectric salt, which can be used for the production of a high-specific capacitance photoconductor. X-ray analysis of the structure, AFM-imaging of the surface and measurement of dielectric frequency characteristics of the samples were carried out. It was found that the intercalated InSe $\langle$ RbNO₃ $\rangle$ samples keeps the type of monocrystalline structure, and the spectrum of X-ray diffraction pattern indicates the implantation of the intercalant in the van der Waals gaps of layered InSe single crystal with an increase in the parameters of the crystal lattice.

AFM images of the surface of nanocomposite material layers show the RbNO₃ islands in the form of nanosized rings. The islands' height does not exceed the width of van der Waals gap for InSe, which is $\approx 0,35$ nm, and the average outside diameter of the rings is ≈ 50 nm. The ensemble of nanorings is characterized by a high surface density in (0001) plane of the crystal layers ($10^9 - 10^{10}$ cm⁻²). Thus, the physical phenomena of self-organization of nanostructures with ionic conductivity on the surfaces of layers with a molecular type of bond are used in the making of nanocomposite material for the proposed photoconductor. This allows us to obtain arrays of nanosized 2D inclusions with ionic conductivity and with given geometrical sizes, morphology and spatial distribution in a matrix of a layered crystal.

The developed photoconductor has a high specific electrical capacity, a high coefficient of overlapping of the capacity ($\approx 10^9$) in the light, has the ability to accumulate electric charge, it can be used as a low-voltage semiconductor device in optoelectronic memory systems, in photoelectric sensors, in light energy converter and in the storage of electric energy.

Keywords: photocapacitor, intercalation, III–VI semiconductor, ferroelectric, nanocomposite.

REFERENCES

1. Bakhtinov A.P., Vodopyanov V.N., Kovalyuk Z.D., Netyaga V.V., Lytvyn O.S. Electrical properties of hybrid (ferromagnetic metal) – (layered semiconductor) Ni/ p -GaSe structures. *Semiconductors*, 2010, vol. 44, iss. 2, pp. 171-183. <https://dx.doi.org/10.1134/S1063782610020077>
2. Bozhevol'nov V.B., Yafyasov A.M., Konorov P.P. [Formation of heterostructures based on cadmium-mercury-tellurium compounds in a semiconductor-electrolyte system]. *Prikladnaya Fizika*, 2005, iss. 5, pp. 98-102 (Rus)
3. Kolbasov G.Ya., Gorodyskii A.V. *Protsessy fotostimulirovannogo perenosa zaryada v sisteme poluprovodnik-elektrolit* [Processes of photostimulated charge transfer in a semiconductor-electrolyte system]. Moscow, Nauka, 1993, 190 p. (Rus)
4. Schefold J., Vetter M. Solar energy conversion at the p -InP/vanadium^{3+/2+}semiconductor/electrolyte contact a study based on differential capacitance and current-voltage data. *Journal of the Electrochemical Society*, 1994, vol. 141, no. 8, pp. 2040-2048. <https://dx.doi.org/10.1149/1.2055057>
5. Lee M.M., Teuscher J., Miyasaka T., Murakami T.N., Snaith H.J. Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites. *Science*, 2012, vol. 333, no. 6107, pp. 643-647. <https://dx.doi.org/10.1126/science.1228604>
6. Zuev V.A., Popov V.G. *Fotoelektricheskie MDP-pribory* [Photoelectric MIS devices]. Moscow, Sov. radio, 1983, 175 p. (Rus)
7. Medzhidov A.B., Muradov R.M., Mekhtieva S.I., Aliev I.M. [Capacitive characteristics of Ni-GeO-GaSe structures under illumination]. *Izv. AN Azerb., ser. FTMN*, 2003, vol. 23, no. 2, pp. 128-134. (Rus)
8. Bakhtinov A.P., Vodopyanov V.M., Kovalyuk Z.D., Netyaga V.V., Tkachuk I.G. [New nanocomposite ferroelectric materials-layered crystals of n -InSe $\langle$ RbNO₃ $\rangle$ and p -GaSe $\langle$ RbNO₃ $\rangle$]. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 83-90. (Ukr)
9. Schimotani H., Asanuma H., Tsukazaki A., Ohtomo A., Kawasaki M., Iwasa Y. Insulator-to-metal transition in ZnO by electric double layer gating. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, vol. 91, no. 8, pp. 082106(1)-082106(3). <https://dx.doi.org/10.1063/1.2772781>
10. Segura A., Guesdon J.P., Besson J.M., Chevy A. Photoconductivity and photovoltaic effect in indium selenide. *J. Appl. Phys.*, 1983, vol. 54, no. 2, pp. 876-888. <https://dx.doi.org/10.1063/1.332050>

Описание статьи для цитирования:

Нетьага В. В., Водопьянов В. Н., Иванов В. Н., Ткачук И. Г., Ковалюк З. Д. Фотоконденсатор на основе наноконкомпозита n -InSe $\langle$ RbNO₃ $\rangle$. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2018, № 2, с. 3–8. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.03>

Cite the article as:

Netyaga V. V., Vodopyanov V. N., Ivanov V. I., Tkachyuk I. G., Kovalyuk Z. D. Photocapacitor based on nanocomposite n -InSe $\langle$ RbNO₃ $\rangle$. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 2, pp. 3-8. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.03>

Д. ф.-м. н. Ф. Ф. СИЗОВ, к. ф.-м. н. А. Г. ГОЛЕНКОВ, к. т. н. В. П. РЕВА,
к. ф.-м. н. В. В. ЗАБУДСКИЙ, С. В. КОРИНЕЦ, А. М. ТОРЧИНСКИЙ

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины

E-mail: sizov@isp.kiev.ua

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МАТРИЦ ПЗС С ЭЛЕКТРОННЫМ УМНОЖЕНИЕМ

Исследованы чувствительность и основные электрические характеристики разработанных матриц приборов с зарядовой связью и электронным умножением с прямой засветкой формата 576×288 и 640×512 при комнатной температуре и низкой освещенности. Характеристики, полученные при освещенности $5 \cdot 10^{-4}$ люкс (свечение звездного неба при легкой облачности) и 10^{-2} люкс (свечение звездного неба и четверти Луны), соответствуют параметрам электронно-оптических преобразователей поколения 2^+ , что предполагает возможность использования таких матриц в приборах ночного видения.

Ключевые слова: ПЗС-фотоматрицы, электронное умножение, чувствительность, дальность обнаружения, идентификация объектов, прямая засветка, низкие освещенности.

Приборы ночного видения гражданского и специального назначения, ключевыми элементами которых являются электронно-оптические преобразователи (ЭОП), широко используются в условиях малой и сверхмалой освещенности в областях спектра от видимого до ближнего инфракрасного (ИК). Несмотря на прогресс в области создания неохлаждаемых тепловизионных приемников ИК-излучения, ЭОП остаются наиболее массовыми системами для визуального наблюдения в темное время суток [1]. Такие устройства необходимы для регулирования движения и вождения автотранспорта в ночных условиях, в спектроскопии при изуче-

нии атмосферы удаленных планет, в охранных системах, телевидении в условиях низкой освещенности и др. Номенклатура приборов ночного видения на основе ЭОП сегодня насчитывает десятки разновидностей, что позволяет сделать необходимый выбор в зависимости от условий наблюдения объектов (например, дальность, коэффициент отражения, контраст, размер объекта и др.), при этом их стоимость находится в диапазоне от нескольких сотен до 10–12 тысяч USD [2].

В охранных системах и системах вождения в ночных условиях обычно используются ЭОП, активно развиваемые с 1940-х годов по настоящее время [1–4]. ЭОП

являются электровакуумными приборами, квантовая эффективность их фотокатодов обычно не превышает 50% (рис. 1), а красная граница фоточувствительности, как правило, меньше 0,9 мкм. Чувствительность фотокатодов лишь частично, в зависимости от используемого материала, перекрывается со спектральной областью чувствительности человеческого глаза в условиях низкой освещенности.

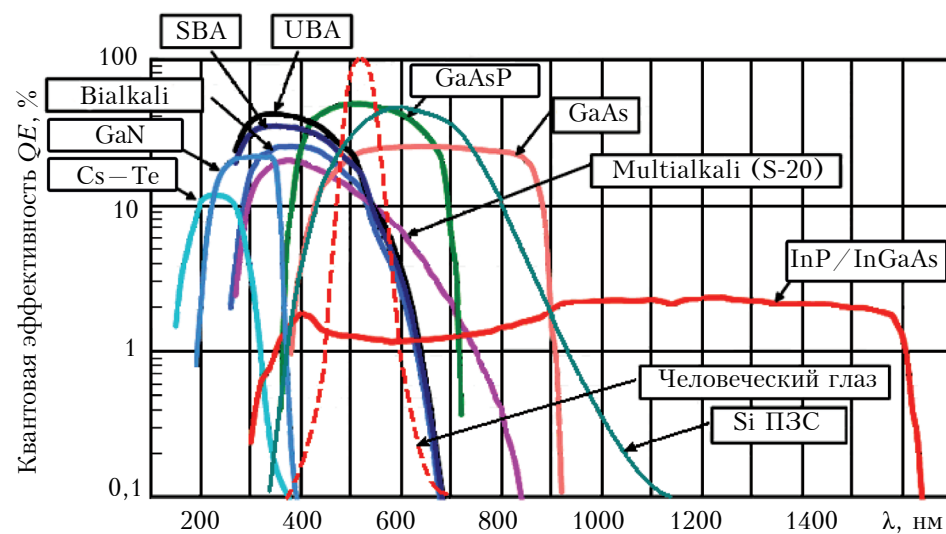


Рис. 1. Спектральные зависимости квантовой эффективности QE фотокатодов различного типа [5] и кремниевых ПЗС с прямой засветкой, а также чувствительность человеческого глаза

В последние два десятилетия успешно развиваются устройства видения с матрицами приборов с зарядовой связью (ПЗС) с внутренним электронным умножением (ЭУ) [6–10]. Такие устройства предназначены для наблюдений в условиях слабой освещенности и регистрации одиночных фотонов, а при дневном освещении их можно использовать, как обычные фотоматрицы фото- и видеокамер (отключено умножение). Благодаря эффекту лавинного умножения зарядовых пакетов до их преобразования в выходной сигнал, в таких приборах может быть обеспечено усиление фотосигнала в тысячи раз, что позволяет существенно улучшить отношение сигнал/шум вплоть до возможности регистрации единичных фотонов. Управляющая электроника ПЗС-ЭУ несколько сложнее, чем, например, в ЭОП поколений 2⁺ и 3⁺, но в них отсутствуют фотокатоды и микроканальные пластинки, они значительно более компактны.

Целью настоящей работы была оценка чувствительности разработанных приборов с зарядовой связью с внутренним электронным умножением в сравнении с вакуумными электронно-оптическими приборами и возможности их использования без охлаждения в устройствах ночного видения.

Исследовались разработанные фотоматрицы формата 576×288 и 640×512, спроектированные с использованием архитектуры покадрового переноса (frame transfer) по 1,5-мкм проектным нормам с размерами фоточувствительных ячеек 20×30 и 16×16 мкм соответственно и изготовленные по *n*-канальной технологии со «скрытым» каналом, четырьмя уровнями поликремниевых электродов и двумя уровнями металлизации [10].

Особенности применения приборов ночного видения

Различные условия наблюдения (освещенность объекта наблюдения, которая зависит как от фазы Луны, так и от географической широты, пропускание атмосферы, контраст между фоном и объектом, его размеры и др.) определяют особенности применения приборов ночного видения [11].

В условиях полной Луны плотность лунного излучения сравнима с плотностью свечения ночного неба в ближней ИК-области спектра. Свечение ночного неба (СНН) является достаточным для использования приборов ночного видения, функционирующих в спектральной области $\lambda = 0,50 - 1,05$ мкм (рис. 2). Практически в этой же спектральной области спектр излучения безлунного ночного неба близок к спектру излучения абсолютно черного тела ($T = 2856$ К) [1].

Интенсивность СНН в видимой области спектра примерно равна интенсивности звездного света, а в инфракрасной области значительно ее превосходит, поэтому ночное небо не является темным даже если исключить свет от звезд [13].

Плотность потока фотонов (см. рис. 2) в областях спектра, где фоточувствительны фотокатоды ЭОП и кремниевые детекторы, сильно зависит от длины волны излучения. Светимость атмосферы в ближней ИК-области спектра слабо зависит от фазы Луны, которая вносит основной вклад в коротковолновом диапазоне спектра. Кроме того, освещенность в ближней ИК-области спектра значительно меньше зависит от атмосферного поглощения по сравнению с видимым диапазоном [12]. Эти два обстоятельства и определяют эффективность применения приборов ночного видения в ближнем ИК-диапазоне спектра.

Для измерения уровня освещенности используются люксметры, спектральная чувствительность которых почти такая же, как и у глаза стандартного наблюдателя (дневное и сумеречное зрение). Поскольку спектральные чувствительности люксметров и исследуемых приборов ночного видения могут между собой не совпадать, при их сравнении желательно учитывать также спектральные зависимости свечения ночного неба, высоты Луны над горизонтом, квантовой эффективности ПЗС-ЭУ $\eta(\lambda)$, коэффициентов отражения наблюдаемых объектов $R(\lambda)$, коэффициентов пропускания атмосферы $t_{\text{атм}}(\lambda)$, объектива $t_{\text{об}}(\lambda)$, времени накопления и т. п. Фактически, необходимо принимать во внимание энергетические характеристики излучения, попадающего на чувствительные элементы исследуемого прибора, и для определения дальности

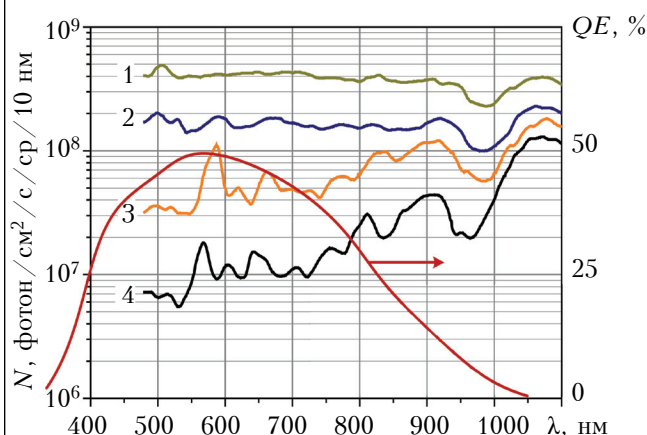


Рис. 2. Плотность потока фотонов N в ночное время в зависимости от фаз Луны [12] и типичная спектральная зависимость квантовой эффективности QE Si ПЗС-структур с прямой засветкой:

- 1 – СНН + 0,89 Луны; 2 – СНН + 0,5 Луны;
3 – СНН + 0,25 Луны; 4 – только СНН

сти обнаружения, распознавания и идентификации объекта сравнивать уровни сигналов с шумовыми характеристиками самой фоточувствительной матрицы.

Предположим, что отраженное от объекта наблюдения излучение обусловлено свечением ночного неба в диапазоне длины волны от λ_1 до λ_2 . Тогда число сгенерированных электронов n_c в одном фоточувствительном элементе ПЗС-ЭУ с учетом коэффициента пропускания оптической системы $\tau_{оп}$, показанной на рис. 3, определяется выражением

$$n_c = \frac{A_d \tau}{4(F\#)^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N(\lambda) \tau_{атм}(\lambda) \tau_{оп}(\lambda) R(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где A_d — площадь фоточувствительного элемента ПЗС-ЭУ.

Предполагается, что коэффициент отражения наблюдаемых объектов $R(\lambda)$ не зависит от угла падения света (подобно плотности мощности ламбертовского источника излучения, когда энергетическая светимость излучающей поверхности не зависит от угла и направления излучения).

На рис. 3 $A_{об}$ — площадь объекта наблюдения, проецируемая оптической системой на фоточувствительный элемент, она соответствует мгновенному полю зрения одного дискретного приемника излучения; $S_{оп} = \pi D^2/4$ — площадь входного зрачка диаметром D ; l — расстояние от объекта до объектива; $\Omega_0 = S_{оп}/l^2$ — телесный угол (поле зрения), в пределах которого излучение от объекта поступает на входной зрачок оптической системы площадью $S_{оп}$; $\Omega = A_{об}/l^2 = A_d/f^2$ — мгновенное поле зрения одного чувствительного элемента. Диафрагменное число $F\#$ для тонких линз при относительно малых плоских углах зрения ($\theta/2 < 15^\circ$) рассчитывается как $F\# = 0,5 \sin \theta/2 \approx f/D$ ($f \geq 2D$).

Оценим размеры площади $A_{об}$ при использовании стандартного стеклянного объектива Nikon AF

Nikkor 50 mm с диафрагменным числом $F\# = 1,8$ ($f = 50$ мм).

Для матрицы 576×288 с размерами чувствительного элемента $L_d = 20 \times 30$ мкм (соответствует разрешающей способности 50 штр./мм) для угла $\Omega = A_{об}/l^2 = A_d/f^2 = 1,6 \cdot 10^{-7}$ ср и дистанции 200 м получим $L_{об} = (A_{об})^{1/2} = 8$ см. Для матрицы 640×512 с размерами чувствительного элемента 16×16 мкм (≈ 63 штр./мм) эта величина составит $L_{об} = 6,5$ см.

Исследование чувствительности матриц ПЗС-ЭУ

Расчет пороговой чувствительности может быть сделан лишь для конкретных условий наблюдения объекта. Для примера рассмотрим два варианта освещенности — звездное небо при наличии легкой облачности (рис. 2, кривая 4, освещенность $E_v \approx 5 \cdot 10^{-4}$ люкс); звездное небо и четверть Луны (кривая 3, $E_v \approx 10^{-2}$ люкс).

Оценим чувствительность матриц ПЗС-ЭУ с прямой засветкой и площадью чувствительного элемента 20×30 мкм при $\tau_{об} = \tau_{атм} \approx 0,9$, $R \approx 0,6$, $F\# = 1,8$ и использовании указанного выше объектива ($f = 50$ мм). В соответствии с формулой (1) получим, что число электронов, генерируемых одним фоточувствительным элементом, составляет примерно 50 e^- /с при $E_v \approx 5 \cdot 10^{-4}$ люкс и 250 e^- /с при $E_v \approx 10^{-2}$ люкс, что при частоте кадров 25 s^{-1} соответствует 2 e^- /пиксел/кадр и 10 e^- /пиксел/кадр.

Из полученных оценок чувствительности могут быть сделаны заключения о дальности обнаружения, распознавания и идентификации наблюдаемого объекта.

Для анализа возможностей применения разработанных матриц ПЗС-ЭУ в системах наблюдения в условиях малой освещенности проводилась экспериментальная оценка чувствительности матриц, которая основывалась на сравнении показаний люксметров и критерии Джонсона [2, 14] (с использованием стандартной тестовой та-

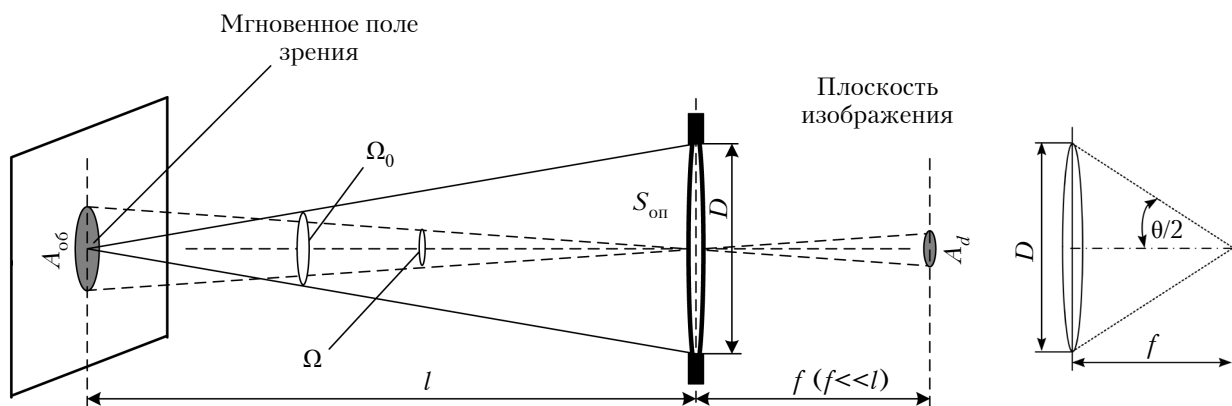


Рис. 3. Схематическое изображение оптической системы

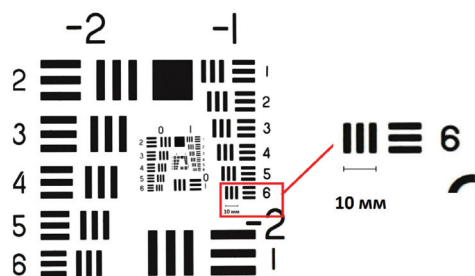


Рис. 4. Тестовая таблица для оценки параметров ПЗС-ЭУ (вынесены размеры одного из элементов таблицы, использованных для оценки дальности обнаружения и идентификации объектов наблюдения)

блицы 1951 USAF resolution target test chart, **рис. 4**) для минимального размера пар линий, различаемых наблюдателем (одна пара состоит из темной и светлой линии). Такое разрешение дает 50%-ю вероятность дискриминации объекта по указанному параметру.

Применение ПЗС-ЭУ наиболее эффективно при числе возбужденных фотоэлектронов в пикселе $n_c < 100$, т. е. при фазе Луны $\leq 0,5$ [1], когда отношение сигнал/шум для ПЗС-ЭУ в несколько раз больше, чем для обычных ПЗС [9]. При уменьшении числа фотоэлектронов в пикселе (снижении освещенности) это отношение растет.

При освещенности $E_v \approx 5 \cdot 10^{-4}$ люкс телевизионные камеры на основе обычных ПЗС являются «слепыми». Если же использовать ПЗС-ЭУ, то это приведет к умножению числа сигнальных (и шумовых) электронов в чувствительном эле-

менте, а также к улучшению соотношения сигнал/шум [9]. Применение даже относительно низкоэффективного ПЗС-ЭУ с прямой засветкой и коэффициентом умножения $K \approx 10^3$ дает возможность проводить наблюдения в условиях сверхнизкой освещенности, как это продемонстрировано на **рис. 5, а** на примере изображения тестовой таблицы. Здесь можно различить достаточно мелкие детали таблицы, хотя изображение зашумлено, что обусловлено флуктуациями попадающих на чувствительный элемент потока фотонов (примерно 2 на пиксел) и шумом темнового сигнала.

При освещенности $E_v \approx 10^{-2}$ люкс камеры с обычными ПЗС в лучшем случае выдают очень зашумленное изображение. При использовании же ПЗС с электронным умножением число электронов, генерируемых фото-чувствительным элементом матрицы, составляет примерно $10 \text{ e}^-/\text{пиксел}/\text{кадр}$, что позволяет даже при коэффициенте умножения $K \approx 10^2$ получить изображение тестовой таблицы достаточно хорошего качества (рис. 5, б).

При $E_v \approx 5 \cdot 10^{-4}$ люкс камера, реализованная с применением разработанных матриц ПЗС-ЭУ, позволит обнаружить человеческую фигуру на расстоянии около 200 м. При этом в соответствии с критерием Джонсона для получения изображения используются 9×9 пикселей, что для указанной дистанции соответствует объекту размером около 0,75 м (ширина плеч человека). Примерно такими же возможностями обладают ЭОП поколения 2⁺ [2]. При освещенности 10^{-2} люкс

Некоторые электрические характеристики матричных ПЗС-ЭУ разных форматов

Параметр	Значение параметра для матрицы форматом	
	576×288	640×512
Пиковое выходное напряжение (нормальный режим), В	0,775	0,11
Пиковое выходное напряжение (режим умножения), В	1,96	1,97
Заряд насыщения выходного сигнала, $\text{e}^-/\text{пиксел}$	$324 \cdot 10^3$	$90 \cdot 10^3$
Зарядовая емкость регистра умножения, $\text{e}^-/\text{пиксел}$	$825 \cdot 10^3$	$900 \cdot 10^3$
Средний «темновой» сигнал ($T = 293 \text{ K}$), $\text{e}^-/\text{пиксел}/\text{с}$	42	490
Шум считывания, $\text{e}^-/\text{пиксел}/\text{с}$	30–40	60–70

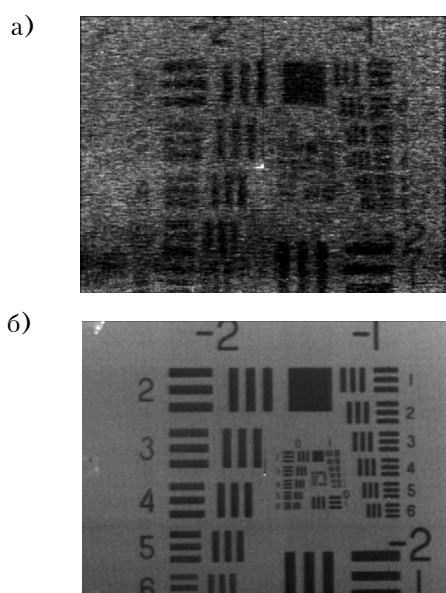


Рис. 5. Изображения тестовой таблицы для определения чувствительности ПЗС-ЭУ, полученные при различных условиях:

а — $E_v \approx 5,4 \cdot 10^{-4}$ люкс, $K \approx 10^3$;
б — $E_v \approx 10^{-2}$ люкс, $K \approx 10^2$

на этом расстоянии может быть идентифицирована человеческая фигура.

Основные электрические характеристики матриц ПЗС-ЭУ формата 576×288 и 640×512 приведены в **таблице**.

Проведенные исследования чувствительности разработанных и изготовленных матриц приборов с зарядовой связью с внутренним электронным умножением с прямой засветкой показали, что на их основе могут быть реализованы приборы ночного видения без охлаждения с параметрами, соответствующими вакуумным электронно-оптическим приборам поколения 2+. Разработанные устройства являются безвакуумными электронными устройствами и могут успешно применяться для контроля движения транспорта, телевидения при низкой освещенности, в охранных системах и др.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Грузевич Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения. — Москва: Физматлит, 2014.
2. Borissova D. Night Vision Devices. — Sofia: Marin Drinov Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2015.
3. Орлов В. А., Петров В. И. Приборы наблюдения ночью при ограниченной видимости. — Москва: Военное издательство, 1989.
4. Саликов В. Л. Приборы ночного видения: история поколений // Спец. техника. — 2000. — № 2. — С. 40—48.

5. <https://www.hamamatsu.com/eu/en/technology/innovation/photocathode/index.html>

6. Denvir D. J., Conroy E. Electron multiplying CCD technology: the new ICCD // Proc. SPIE. — 2002. — P. 4796. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.457779>

7. Seitz P., Theuwissen A. J. P. Single-Photon Imaging. — Springer, 2011.

8. Daigle O., Djazovski O., Francoeur M. et al. EMCCDs: 10 MHz and beyond // Proc. SPIE 9154, 91540B. — 2014. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.2054977>

9. Wilkins A. N., McElwain M. W., Norton T. J. et al. Characterization of a photon counting EMCCD for space-based high contrast imaging spectroscopy of extrasolar planets // Proc. SPIE 9154, 91540C. — 2014. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.2055346>

10. Рева В. П., Коринец С. В., Голенков А. Г. и др. ПЗС-фотоматрицы с электронным умножением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2017. — № 1–2. — С. 33–37. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2017.1-2.33>

11. Borissova D. Night vision devices choice taking into account the external surveillance conditions // Advanced Modeling and Optimization. — 2008. — Vol. 10, N 2. — P. 213—220.

12. Derviere F. Quantum efficiency advances sensors for night vision. — Euro Photonics, 2012.

13. Vatsia M. L. Atmospheric optical environment. — United States: N. p., 1972. Web.

14. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы смотрящего типа. — Москва: Логос, 2004.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 02.03 2018 г.*

**Ф. Ф. СИЗОВ, О. Г. ГОЛЕНКОВ, В. П. РЕВА, В. В. ЗАБУДСЬКИЙ,
С. В. КОРИНЕЦЬ, А. М. ТОРЧИНСЬКИЙ**

Україна, м Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
E-mail: sizov@isp.kiev.ua

ЧУТЛИВІСТЬ МАТРИЦЬ ПЗЗ ІЗ ЕЛЕКТРОННИМ МНОЖЕННЯМ

Досліджено чутливість і основні електричні характеристики розроблених матриць приладів із зарядовим зв'язком і електронним множенням з прямим засвіченням при кімнатній температурі і низькій освітленості. Фотоматриці формату 576×288 і 640×512 були спроектовані з використанням архітектури покадрового перенесення (frame transfer) по 1,5-мкм проектним нормам з розмірами фоточутливих елементів 20×30 і 16×16 мкм відповідно і виготовлені по n-канальній технології з «прихованим» каналом, чотирма рівнями полікремнієвих електродів і двома рівнями металізації. Для аналізу можливостей застосування розроблених матриць ПЗЗ-ЕМ в системах спостереження в умовах малої освітленості проводилася експериментальна оцінка чутливості матриць. Вона ґрунтувалася на порівнянні показань люксметрів та критерії Джонсона з використанням стандартної тестової таблиці 1951 USAF resolution target test chart для мінімального розміру пар ліній, що розрізняються спостерігачем (одна пара складається з темної і світлої ліній). Характеристики, отримані при освітленості 5·10⁻⁴ люкс (світіння зоряного неба при легкій хмарності) і 10⁻² люкс (світіння зоряного неба і чверті Місяця), відповідають параметрам електронно-оптичних перетворювачів покоління 2+, що передбачає можливість використання таких матриць в приладах нічного бачення. При E₀ ≈ 5·10⁻⁴ люкс камера, реалізована з застосуванням розроблених матриць ПЗЗ-ЕМ, дозволить виявити людську фігуру на відстані близько 200 м. При освітленості 10⁻² люкс на цій відстані людська фігура може бути ідентифікована.

Ключові слова: ПЗР-фотоматриці, електронне множення, чутливість, дальність виявлення, ідентифікація об'єктів, пряме засвічення, низькі освітленості.

DOI: 10.15222/TKEA2018.2.09
UDC 621.383.72

F. F. SIZOV, A. G. GOLENKOV,
V. P. REVA, V. V. ZABUDSKY,
S. V. KORINETS, A. M. TORCHINSKY

Ukraine, Kiev, Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine
E-mail: sizov@isp.kiev.ua

SENSITIVITY OF CCD MATRICES WITH ELECTRONIC MULTIPLICATION

The sensitivity and basic electrical characteristics of the developed direct illumination matrices with charge-coupled devices and electronic multiplication were investigated at room temperatures and low illumination. Photomatrices of 576×288 and 640×512 format were designed using frame transfer architecture and 1.5-μm design rules with photosensitive cell sizes of 20×30 and 16×16 μm, respectively, and manufactured using n-channel technology with buried channel, four levels of polysilicon electrodes and two levels of metallization. To analyze the possibilities of the developed EMCCD matrices used in monitoring systems at low-light conditions, an experimental assessment of the matrices sensitivity was carried out.

The assessment was based on a comparison of the luxmeter readings and Johnson's criteria using the standard 1951 USAF resolution target test table for the minimum size of line pairs distinguished by the observer (one pair consists of a dark and a light lines). The characteristics obtained with illumination of $5 \cdot 10^{-4}$ lux (glow of the starry sky with light clouds) and 10^{-2} lux (glow of the starry sky and the quarter of the Moon) corresponds to the parameters of generation 2+ electron-optical converters, which implies the possibility to use such matrices in night vision devices. At $E_v \approx 5 \cdot 10^{-4}$ lux, the camera with the developed EMCCD matrices will detect a human figure at the distance of about 200 m. With illumination of 10^{-2} lux at this distance a human figure can be identified.

Keywords: CCD-photomatrix, electronic multiplication, sensitivity, range of detection, identification of objects, direct illumination, low illumination.

REFERENCES

1. Gruzevich Yu. K. *Optiko-elektronnye pribory nochnogo videniya* [Optoelectronic night vision devices]. Moscow, Fizmatlit, 2014, 276 p. (Rus)
2. Borissova D. *Night Vision Devices*. Sofia, Marin Drinov Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2015.
3. Orlov V. A., Petrov V. I. *Pribory nablyudeniya noch'yu pri ogranichennoi vidimosti* [Observation devices at night with reduced visibility]. Moscow, Voennoe izdatel'stvo, 1989. (Rus)
4. Salikov V. L. [Night Vision Devices: the History of Generations]. *Spets. tekhnika*, 2000, no. 2, pp. 40-48. (Rus)
5. <https://www.hamamatsu.com/eu/en/technology/innovation/photocathode/index.html>
6. Denvir D. J., Conroy E. Electron multiplying CCD technology: the new ICCD. *Proc. SPIE*, 2002, pp. 4796. <http://dx.doi.org/10.1117/12.457779>
7. Seitz P., Theuwissen A. J. P. *Single-Photon Imaging*, Springer, 2011, 354 p.
8. Daigle O., Djazovski O., Francoeur M., Laurin D. G. Doyon R. EMCCDs: 10 MHz and beyond. *Proc. SPIE* 9154, 91540B, 2014. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2054977>
9. Wilkins A. N., McElwain M. W., Norton T. J. et al. Characterization of a photon counting EMCCD for space-based high contrast imaging spectroscopy of extrasolar planets, *Proc. SPIE* 9154, 91540C, 2014. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2055346>
10. Reva V. P., Korinets S. V., Golenkov A. G., Sapon S. V., Torchinsky A. M., Zabudsky V. V., Sizov F. F. CCD photomatrixes with electron multiplication. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*, no. 1-2, pp. 33-37. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2017.1-2.33> (Rus)
11. Borissova D. Night vision devices choice taking into account the external surveillance conditions. *Advanced Modeling and Optimization*, 2008, vol. 10, no. 2, pp. 213-220.
12. Derviere F. Quantum efficiency advances sensors for night vision. *Euro Photonics*, 2012.
13. Vatsia M. L. *Atmospheric optical environment*. United States, N. p., 1972. Web.
14. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. *Infrakrasnye sistemy smotryashchego tipa* [Infrared systems of the looking type]. Moscow, Logos, 2004, 452 p.

Описание статьи для цитирования:

Сизов Ф. Ф., Голеньков А. Г., Рева В. П., Забудский В. В., Коринец С. В., Торчинский А. М. Чувствительность матриц ПЗС с электронным умножением. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 2, с. 9—14. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.09>

Cite the article as:

Sizov F. F., Golenkov A. G., Reva V. P., Zabudsky V. V., Korinets S. V., Torchinsky A. M. Sensitivity of CCD matrices with electronic multiplication. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 2, pp. 9-14. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.09>

S. BHUSHAN¹, S. ANTOSHCHUK²India, Delhi, ¹School of Computer and Information Science, Indira Gandhi National Open University;
Ukraine, ²Odesa National Polytechnic University

E-mail: s.bhushan2k5@gmail.com, asgonpu@gmail.com

A HYBRID APPROACH TO ENERGY EFFICIENT CLUSTERING FOR HETEROGENEOUS WIRELESS SENSOR NETWORK

Meta-heuristic methods have shown good efficiency in solving optimization problems related to a wide range of practical applications in wireless sensor networks (WSN). Biogeography based optimization (BBO) is an evolutionary technique inspired by the migration of species between habitats which have been applied in solving global optimization problems. The article presents a hybrid approach for clustering wireless sensor networks that combines the meta-heuristic algorithm BBO, and K-environments. The simulation results show that the proposed approach (named KBBO) significantly improved the efficiency of such WSN parameters as stability time, lifetime, residual energy and throughput.

Keywords: clustering, network life time, stability period, BBO, optimization.

A wireless sensor network (**WSN**) consists of a large number of sensor nodes which can sense physical properties of environment such as humidity, temperature, sound, etc., collect sensed data and transmit it to the base station through a wireless link. Sensor nodes are characterized by limited energy, low processing capability, low communication range and low memory capacity. Recently, sensor nodes have become smarter and cheaper due to development in micro-electro-mechanical systems (**MEMS**) [1]. Due to availability of smarter and cheaper sensors, WSN has received wide acceptability with potential application in large domains: environment monitoring, disaster warning systems, health systems and military applications [2]. Unlike a traditional network, the major research challenge in WSN is how to maximize the network lifetime by reducing energy consumption of the sensor nodes.

Clustering is a key technique to reduce energy consumption and extend the lifetime of the network. Besides reduction in energy consumption and extending network lifetime, clustering technique has many other advantages: scalability, latency reduction, collision avoidance, less overhead and load balancing [3]. Selection of cluster heads (**CHs**) in energy efficient clustering mechanisms depends upon several factors: residual energy of a node, initial energy, average energy of a network and energy consumption of the node [4].

Clustering is also a key technique for implementing energy efficient routing in WSN. Low energy-adaptive cluster hierarchy (**LEACH**) [5], standard evaluation protocol (**SEP**) [6], hybrid

energy-efficient distributed clustering (**HEED**) [7] and power-efficient gathering in sensor information systems (**PEGASIS**) [8] are some prominent clustering-based routing protocols. The probabilistic models are used to select CHs in these protocols which may result in random selection of CHs irrespective of distribution of nodes and the residual energy of the network. In recent days a number of metaheuristic techniques such as genetic algorithm (**GA**) [9], particle swarm optimization (**PSO**) [10] and biogeography based optimization (**BBO**) [11] have been applied in design of energy-efficient clustering-based routing protocols for WSN. Intelligent hierarchical clustering routing (**IHCR**) [12] and evolutionary routing protocol (**ERP**) [13] are two important protocols.

Heuristic approach for finding a solution to optimal CHs in WSNs is not easy, because this is an NP-complete problem [14]. A total time complexity to find the optimal solution increases exponentially with the increase in the network size. BBO has been found to be a powerful search and optimization technique, because it combines both exploration and exploitation features based on migration [15]. BBO, like GA, is an evolutionary algorithm applied to solve global optimization problems. In this work, a BBO-based clustering technique is used to search for appropriate cluster heads that would allow for optimal resulting clusters. To have good quality habitats, K-means clustering is applied to seed the population of the BBO protocol. K-means clustering [16] is one of the most popular data clustering techniques which

partitions the data into K -clusters, so that similar data is put in the same cluster.

The main contribution of the paper is the following:

- population initialization through K -means clustering to select good quality features in a habitat;
- clustering through the BBO protocol;
- performance comparison with high performance heuristic and metaheuristic techniques.

Literature Survey

Many heuristic techniques have been proposed for cluster based routing for WSNs. LEACH is the most prominent protocol which does load balancing by dynamically rotating CHs among sensor nodes in order to save energy. However, the main drawback is that a selection of a CH is done probabilistically. As a result, a node with very low energy may be selected as a CH which may not last for a long time. Therefore a large number of protocols have been proposed to improve the performance of LEACH such as SEP, HEED and PEGASIS, and its variants.

Besides heuristics, several metaheuristic techniques have been used for design of energy-efficient clustering and routing. Martin et al. [12] have used GA for energy efficient cluster-based routing to extend the network lifetime and minimize the energy consumption of the network. Its cluster head selection process is based on multi-objective parameters: the sum of all distances from sensor nodes to the CH and from the CH to the base station, the sum of distances from sensors node to CH, distances from the CH to the sink, standard deviation in cluster distance, transfer energy and number of transmissions.

Bara'a et al. [13] have further enhanced the clustering parameters of IHCR by adding three parameters: intra-cluster distance, inter-cluster distance and the number of CHs. Unlike the previous two algorithms, where GA has been used for CH selection, in [17] GA has been used for load balancing of CHs. Its fitness function is based on standard deviation of the gateway load to achieve even distribution of the load per cluster.

In [18] two algorithms (one for routing and one for clustering) using PSO have been proposed. The main objectives for routing is to minimize the maximum transmission distance between two nodes in the routing path and maximum hop count of the gateways, whereas clustering path of the algorithm achieves load balancing by minimizing distance between sensor nodes and their corresponding gateways.

In [19], the BBO-based clustering has been proposed. Metrics like clustering density and clustering head dispersion were used to select

CHs. Similarly in [20], BBO-based clustering and multi-hop routing algorithms are proposed with different fitness functions. Multi-objective parameters which include residual energy of a CH, intra-cluster distance and distance between the CH and the base station. The formulation of fitness function for routing algorithm is based on residual energy, Euclidean distance and node degree. Unlike the above mentioned protocols, where population initialization is random, the proposed protocol follows the deterministic approach to population initialization. The entire population is seeded with K -means algorithm to have good quality genes. BBO will be used further for clustering.

An Overview of BBO

BBO [11] is a population-based optimization algorithm inspired by immigration and emigration of species (animals, birds, fish) between habitats (islands) in search of good living condition (rainfall, temperature, etc). Each candidate solution also called a habitat with a habitat suitability index (**HSI**). Variables of an individual solution represents features of habitability are called suitability index variables (**SIVs**). High HSI represents a good solution. The poor solution represents habitat with low HSI. The low HSI receives new features from high HSI. There are three kinds of operators in BBO namely, migration, elitism and mutation. Migration is used for information sharing. Elitism is used to keep best solution for the next generation. The objective of mutation is to increase exploration among the population. One unique feature of BBO is that the original population is not discarded after each generation unlike GA. Rather, it improves its solution in each iteration by changing its features (SIVs). Like PSO, BBO also shares its SIVs (features) with other solutions, but does it directly, while PSO shares information among solutions indirectly through a velocity variable.

The Proposed Protocol, KBBO

In the current work the authors propose a new hybrid evolutionary algorithm named KBBO which combines K -means and the BBO to solve the clustering problem in WSN. A combination of deterministic and metaheuristic approaches for population initialization and clustering respectively provide a good BBO-based clustering solution. The proposed protocol goes through several rounds. Each round has two phases: setup phase and steady state phase. In the setup phase, sensor nodes are partitioned into clusters. The setup phase of the algorithm is same as that of LEACH but based on BBO algorithm. In the second phase, each non-CH node uses its TDMA schedule to transmit

its data to the base station through its respective CHs in multi-hop manner.

In BBO a habitat represents a set of sensor nodes elected as CHs, normal nodes and dead nodes. Therefore a size of a habitat is a number of sensor nodes in a network. A binary representation is used to distinguish nodes. CH is represented as 1, a non-CH node as 0 and a dead node. The habitat in the population is seeded with K -means algorithm.

In KBBO, the fitness function F is defined as follows:

$$F = \frac{\text{intra-cluster distance}}{\text{inter-cluster distance}} = \frac{\sum_{i=1}^{CH_k} \sum_{\forall S_j \in CH_i} d(S_j, CH_i)}{\sum_{i=1}^{CH_k} \sum_{\forall CH_i \neq CH_j} d(CH_i, CH_j)},$$

where C_j is a sensor node; C_i, CH_j are two different cluster heads; d denotes the Euclidean distance.

In order to achieve optimal clustering in WSN, intra-cluster distance must be minimized where as inter-cluster distance must be maximized.

GA based clustering algorithm in KGA has setup phase which is a clustering formation phase and steady phase in which intra-cluster and inter-cluster communication takes place. The setup phase of the algorithm is same as that of LEACH but based on BBO algorithm.

Simulation Results

Network Model

The following are the assumptions with respect to WSN in the proposed protocol:

- sensors are randomly deployed throughout the sensing area;
- sensor nodes are heterogeneous in terms of initial energy;
- energy consumption of the sensor node during data transmission depends upon the (i) distance between a sender and a receiver and (ii) the size of data;
- a node calculates distance to other nodes and CHs based on Euclidean distance;
- sensor nodes communicates with a sink node deployed in the middle through their respective CHs;
- nodes are stationary after deployment;
- communication links are symmetric.

Energy Model

In this work a simple radio model [5] is used to model the energy dissipation. The free space model (d^2 power loss) is employed in case the distance be-

tween the transmitter and the receiver is less than a threshold value d_0 , otherwise multipath fading channel model (d^4 power loss) is employed. The energy consumption for a l bit message between two nodes at a d distance is calculated thus

$$ET_x(l, d) = E_{\text{elec}} \cdot l + \epsilon_{fs} \cdot l \cdot d^2 \text{ at } d \leq d_0, \quad (2)$$

$$ET_x(l, d) = E_{\text{elec}} \cdot l + \epsilon_{mp} \cdot l \cdot d^4 \text{ at } d > d_0;$$

$$ER_x(l, d) = E_{\text{elec}} \cdot l. \quad (3)$$

where $ET_x(l, d)$ is l bit transmission energy consumption at a distance of d ; $ER_x(l, d)$ is l bit receiving energy consumption; E_{elec} is per bit energy consumption of transmitter and receiver circuits; ϵ_{fs} and ϵ_{mp} refer to energy consumption factor of amplification for the free space and multipath fading models respectively.

Performance Metrics

The performance of KBBO has been compared with SEP, HCR and ERP on five metrics: network lifetime (number of alive nodes vs. number of rounds), residual energy, stability period and throughput for 10% and 20% advanced nodes. The results have been further validated quantitatively (through tables) The network and energy models are used as defined in LEACH.

– *Network lifetime*. It is defined as the number of rounds when all the nodes exhaust their energy and eventually they die.

– *Stability period*. It refers to the time interval from the start of the network operation (first round) until the first node dies.

– *Residual energy*. It measures the remaining energy of the network every round which is calculated by subtracting the energy consumed by the nodes from the total energy per round.

– *Number of alive nodes per round*. It refers to a number of advanced nodes or normal nodes whose residual energy values is greater than zero.

– *Throughput*. It is a number of packets received at the sink node from the CHs.

Simulation Settings

The protocol has been implemented using Intel Core i3 processor with 2GB RAM with 100 sensor nodes which are randomly deployed over the area of 100×100 m. The location of the sink is in the middle of the deployment area. The parameters for simulation settings are shown in **Table 1**.

Table 2 shows that the stability of the KBBO protocol is better than that of SEP and HCR for the case of 20% advanced nodes.

Network Lifetime

Network lifetime can be shown by capturing the number of live nodes at each round till every node in the network dies. To clearly depict the effectiveness of the proposed algorithm, the results are shown quantitatively in **Tables 3** for 10% and 20% of advanced nodes in the network

Table 1

Parameters setting for simulation

Description	Value
Network size	100×100 m
Location of sink, BS	(50, 50)
Number of nodes, n	100
Initial energy of nodes, E_0	0,5 J
Proportion of advanced nodes, m_0	0,1
Energy factor for advanced nodes, α	1
Energy dissipated per bit, E_{elec}	50 nJ/bit
Transmit amplifier if $d_{BS} \leq d_0$, E_{fa}	10 pJ/bit/m ²
Transmit amplifier if $d_{BS} > d_0$, E_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴
Data aggregation energy by CH, E_{DA}	5 nJ/bit/message
Size of data packet	4000 bits

Table 2

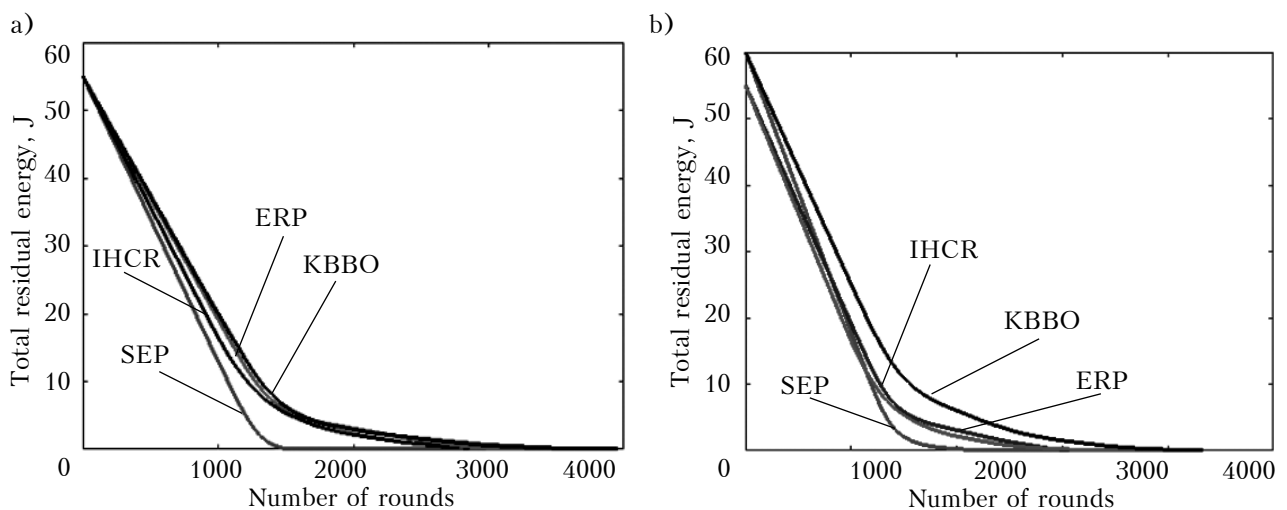
Stability period for different protocols for different number of advanced nodes M

M	SEP	HCR	ERP	KBBO
10%	864	914	1012	888
20%	999	920	1079	1034

Table 3

Round history of dead nodes for different number of advanced nodes M

Dead nodes, %	$M = 10\%$				$M = 20\%$			
	SEP	HCR	ERP	KBBO	SEP	HCR	ERP	KBBO
10	1153	1047	1205	1225	1185	1050	1190	1204
20	1204	1099	1256	1283	1219	1146	1258	1308
30	1232	1159	1295	1342	1250	1208	1312	1363
40	1278	1255	1364	1386	1284	1276	1364	1432
50	1300	1303	1390	1431	1323	1353	1408	1494
60	1328	1372	1432	1516	1368	1430	1480	1573
70	1370	1459	1535	1622	1424	1569	1572	1719
80	1445	1940	1683	1720	1529	1928	1887	2086
90	1494	1956	2445	2123	1791	2529	2747	2938
100	1563	3220	3317	3952	2236	3536	3673	4336



Dependence of the residual energy on the number of rounds for 10% (a) and 20% (b) of advanced nodes

respectively. Table 3 shows that in case of KBBO, nodes die much later than in case of SEP, HCR and ERP. In the KBBO 10% of nodes die at the 1225th round while in other protocols, nodes died very early — at the 1153th, 1047th, and 1205th round for SEP, HCR, and ERP respectively. In KBBO, all nodes die only at the 3952nd round (at the 1562nd round in SEP, at 3220th round in IHCR and at 3317th round in ERP). With 20% advanced nodes, the performance of KBBO is significantly better than that of ERP.

Residual Energy

Figure shows the comparison of KBBO with the other protocols in terms of residual energy versus number of rounds with 10% and 20% of advanced nodes. The curve is less steep due to fairness in the energy load distribution and gradual dissipation of energy in the proposed protocol.

Conclusion

Many clustering-based routing techniques have been proposed in order to save energy and extend the network lifetime. LEACH is the most prominent protocol but it has its own limitation. Selection of CHs is done probabilistically and the network lifetime is not maximized significantly. Selection of optimal CHs in WSN is an optimization problem. Metaheuristic techniques offer an effective alternative for solving optimization problems. In this paper, a new protocol KBBO is proposed based on the BBO. BBO is the latest evolutionary technique for solving optimization problems. The proposed technique is explained through population initialization, setup phase and transmission phase algorithms. The performance of KBBO has been rigorously tested and compared with SEP, IHCR and ERP on several metrics: network life time (number of alive nodes vs. number of rounds), residual energy, stability period and throughput for 10% and 20% of advanced nodes. The results have been further validated quantitatively (through tables). The results show the superiority of the KBBO protocol over several parameters.

REFERENCES

1. Jennifer Yi., Mukherjee B., Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Computer networks*, 2008, vol. 52, no 12, pp. 2292-2330.
2. Akyildiz I.F., SuWeilian, Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, vol. 40, no 8, pp. 102-114.
3. Xuxun L. A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks. *Sensors*, 2002, vol. 12, no 8, pp. 11113-11153.
4. Katiyar Vi., Narottam Ch., Surender So. Clustering algorithms for heterogeneous wireless sensor network: A survey. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2010, vol. 1, no 2, p. 273.
5. Heinzelman W. B., Chandrakasan A. P., Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on wireless communications*, 2002, vol. 1, no 4, pp. 660-670.
6. Smaragdakis G., Matta I., Bestavros A. *SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks*. Boston University Computer Science Department, 2004.
7. OssamaYo., Fahmy So. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on mobile computing*, 2010, vol. 3, no 4, pp. 366-379.
8. Lindsey S. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems. *IEEE Aerospace conference proceedings*, 2002, vol. 3.
9. Michalewicz Zb. *Genetic algorithms + data structures = evolution programs*. Springer, 2009.
10. Kennedy J. Particle swarm optimization. *Encyclopedia of machine learning*, Springer US, 2011, pp. 760-766.
11. Simon D. Biogeography-based optimization. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 2008, vol. 12, no 6, pp. 702-713.
12. Matin A. W., Hussain S. *Intelligent hierarchical cluster-based routing*. 2006, vol. 7, 8 p.
13. Bara'a A. A., Khalil E. A. A new evolutionary based routing protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks. *Applied Soft Computing*, 2012, vol. 12, no. 7, pp. 1950-1957.
14. Basagni S. A. generalized clustering algorithm for peer-to-peer networks. *Proc. Workshop on Algorithmic Aspects of Communication*, 1997.
15. Ma H., Simon D., Siarry P., Yang Z., Fei M. Biogeography-based optimization: A 10 year review. *IEEE transaction on emerging topics in computational intelligence*, 2017, vol. 9, no 5, pp. 391-407.
16. Han J., Kamber M. *Data Mining: Concepts and Techniques*. Morgan Kaufman Publishers. 2006.
17. Kuila Pr., Suneet K.G., Prasanta K. J. A novel evolutionary approach for load balanced clustering problem for wireless sensor networks. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2013, no 12, pp. 48-56.
18. Kuila Pr., Prasanta K. J. Energy efficient clustering and routing algorithms for wireless sensor networks: Particle swarm optimization approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2014, no 33, pp. 127-140.
19. Raju P., Pandey H. M. A., Saraswat M. BEECP: Biogeography optimization-based energy efficient clustering protocol for HWSNs. *Ninth International Conference on IEEE Contemporary Computing*, 2016.
20. Lalwani Pr., Haider B., Chiranjeev K. BERA: A biogeography-based energy saving routing architecture for wireless sensor networks. *Soft Computing*, 2016, pp. 1-17. <http://10.0.68.77/ijst/2015/v8i16/61986>

Received: 16.03 2018

DOI: 10.15222/TKEA2018.2.15
УДК 004.7

Ш. Ш. БХУШАН¹, С. Г. АНТОЩУК²

Індія, Делі, ¹Національний відкритий університет Індіри Ганді
Україна, ²Одеський національний політехнічний університет
E-mail: s.bhushan2k5@gmail.com, asgonpu@gmail.com

ГІБРИДНИЙ ПІДХІД ДО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ КЛАСТЕРІЗАЦІЇ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННОЇ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

Гетерогенні бездротові сенсорні мережі (БСМ) сьогодні знаходять широке застосування у моніторингу навколишнього середовища, в системах безпеки, охорони здоров'я та військовій сфері. Основною проблемою БСМ є необхідність максимізувати час життя мережі, зменшуючи при цьому споживання енергії вузлів сенсора. Для її вирішення удосконалюють протоколи маршрутизації за рахунок удосконалення процедури кластеризації для БСМ. Метаевристичні методи показали гарну ефективність при вирішенні задач оптимізації, пов'язаних з широким спектром практичних застосувань в бездротових сенсорних мережах. Оптимізація на основі біогеографії (ВВО) — це еволюційний метод, заснований на міграції видів між середовищами існування, який широко застосовується при вирішенні завдань глобальної оптимізації. Визначено завдання оптимізації в термінах і позначеннях моделей біогеографії: кожний острів представляє одне рішення, відображене ознакою життєздатності — цільовою функцією, значення якої є індексом придатності острова-рішення. Хороше рішення має високий показник придатності. У статті представлено гібридний підхід для кластеризації бездротових сенсорних мереж, який об'єднує метаевристичний алгоритм ВВО та метод кластеризації К-середніх.

Для дослідження запропонованого підходу до енергоефективної кластеризації для гетерогенної бездротової сенсорної мережі на його основі розроблено протокол маршрутизації, названий KBVO. Продуктивність KBVO була ретельно протестована та порівняна з відомими протоколами SEP, IHCR та ERP за кількома показниками: тривалість життєвого циклу мережі (кількість живих вузлів, кількість раундів), залишкова енергія, період стабільності та пропускна здатність на 10% та 20% розширених вузлів. Результати моделювання показали, що запропонований підхід дозволив значно покращити ефективність вказаних параметрів БСМ.

Ключові слова: кластеризація, час життя мережі, період стабільності, ВВО, оптимізація.

Ш. Ш. БХУШАН¹, С. Г. АНТОЩУК²

Індія, Делі, ¹Национальный открытый университет Индиры Ганди
Украина, ²Одесский национальный политехнический университет
E-mail: s.bhushan2k5@gmail.com, asgonpu@gmail.com

ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

Гетерогенные беспроводные сенсорные сети (БСМ) сегодня находят широкое применение в мониторинге окружающей среды, в системах безопасности, здравоохранения и военной сфере. Основной проблемой БСМ является необходимость максимизировать время жизни сети, при этом уменьшая потребление энергии узлов сенсора. Для ее решения совершенствуют протоколы маршрутизации за счет совершенствования процедуры кластеризации для БСМ. Метаэвристические методы показали хорошую эффективность при решении задач оптимизации, связанных с широким спектром практических применений в беспроводных сенсорных сетях. Оптимизация на основе биогеографии (ВВО) — это эволюционный метод, основанный на миграции видов между средами существования, который широко применяется при решении задач глобальной оптимизации. Определены задачи оптимизации в терминах и обозначениях моделей биогеографии: каждый остров представляет одно решение, отраженное признаком жизнеспособности — целевой функцией, значение которой является индексом годности острова-решения. Хорошее решение имеет высокий показатель годности. В статье представлен гибридный подход для кластеризации беспроводных сенсорных сетей, объединяющий метаэвристический алгоритм ВВО и метод кластеризации К-средних.

Для исследования предложенного подхода к энергоэффективной кластеризации для гетерогенной беспроводной сенсорной сети на его основе разработан протокол маршрутизации, названный KBVO. Производительность KBVO была тщательно протестирована и сравнивалась с известными протоколами SEP, IHCR и ERP по нескольким показателям: продолжительность жизненного цикла сети (количество живых узлов, количество раундов), остаточная энергия, период стабильности и пропускная способность на 10% и 20% расширенных узлов. Результаты моделирования показали, что предлагаемый подход позволил значительно улучшить эффективность указанных параметров БСМ.

Ключевые слова: кластеризация, время жизни сети, период стабильности, ВВО, оптимизация.

Cite the article as / Описание статьи для цитирования:

Bhushan S., Antoshchuk S. A hybrid approach to energy efficient clustering for heterogeneous wireless sensor network. Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature, 2018, no. 2, pp. 15-20. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.15>

К. т. н. В. А. БОЛТЕНКОВ, В. И. КУВАЕВА, к. т. н. П. П. ЧЕРВОНЕНКО

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: vaboltentkov@gmail.com

МЕТОД ЭКСПЕРТНОГО ВЫБОРА ЦИФРОВЫХ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИКИ НА ОСНОВЕ МАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрена задача выбора программируемых логических микроконтроллеров для систем промышленной автоматизации на основе коллективного экспертного оценивания. Разработан метод коллективного экспертного выбора на базе марковской цепи. Метод основан на представлении набора индивидуальных ранжирований альтернатив, выполненных группой экспертов, в виде матрицы переходных вероятностей. На марковском графе, построенном по переходной матрице, для ранжирования альтернатив применяется правило Коупленда. Метод апробирован при коллективном экспертном выборе рационального варианта при закупке промышленной партии программируемых логических микроконтроллеров.

Ключевые слова: программируемый логический микроконтроллер, промышленная автоматика, экспертное оценивание, коллективное ранжирование, ранговая шкала, марковская цепь.

На современном рынке цифровых компонентов для систем промышленной автоматизации, в частности программируемых логических микроконтроллеров, конкурирующими производителями предлагается широкий спектр аналоговичных по назначению изделий. При этом экспертная оценка и обоснованный выбор наиболее подходящих цифровых компонентов является сложной и ответственной задачей, для решения которой известные методы проведения экспертиз [1, 2] не вполне подходят в связи с трудоемкостью обработки результатов. Поэтому разработка метода экспертного выбора цифровых компонентов, позволяющего по сравнению с известными методами более быстро получать обобщенную коллективную экспертную оценку (**КЭО**), оценивать согласованность мнений экспертов и принимать обоснованные решения, является весьма актуальной задачей.

Анализ существующих методов экспертного оценивания и выбора

Основными требованиями к коллективной экспертной оценке являются ее достоверность, а также оперативность ее формирования. Современная экспертиза проводится, как правило, в ранговой шкале, т. е. группе экспертов предлагается множество n альтернативных вариантов $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, подлежащих упорядочению по какому-либо критерию (или ряду критериев). Каждый из экспертов упорядочивает варианты и представляет индивидуальное ранжирование. Например, для множества

$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$ может быть установлено ранжирование $\langle a_1 \succ a_2 \succ a_3 \prec a_4 \succ a_5 \rangle$, где знаки $\succ$ и $\prec$ означают «более предпочтительно, чем ...» и «менее предпочтительно, чем ...» соответственно. Каждое индивидуальное ранжирование может быть представлено в виде таблицы $P^k = \{q_1^k, q_2^k, \dots, q_n^k\}$, где q_i^k — позиция, занимаемая i -й альтернативой в ранжировании k -го эксперта (или ранг). Главной задачей коллективного экспертного оценивания является формирование коллективного (или консенсусного) ранжирования, отражающего наилучшим образом оценки вариантов, сформированные каждым экспертом.

Методы формирования коллективного ранжирования делятся на несколько групп. Первая из них — методы медианных ранжирований, из которых наиболее известна медиана Кемени [3–5], менее известны медиана Кука — Сейфорда и медиана Литвака [2, 6]. Они основаны на концепции расстояния между ранжированиями и заключаются в определении ранжирования, ближайшего по некоторой математической мере ко всем индивидуальным мнениям экспертов. Эта группа методов считается наиболее достоверной и математически обоснованной. Методы построены на определенной аксиоматике и являются максимально правдоподобными оценками на ранговых шкалах [2, 6]. Главным недостатком медианных методов ранжирования является их вычислительная трудоемкость. В частности, доказано, что все три вида медиан являют-

ся NP-полными задачами, время счета для которых растет значительно быстрее полиномиального с увеличением числа ранжируемых альтернатив. Так, в [7] показано, что для формирования коллективной оценки по медиане Кемени вычислительная сложность задачи оценивается как $O(n!)$. Поскольку $n!$ стремительно растет с ростом n , решение для 10-элементного множества альтернатив на современном компьютере средней производительности можно получить в течение долей секунды, 11-элементного — за 3 с, 12-элементного — за 30 с, 15-элементного — более чем за сутки.

Другая группа методов — методы КЭО, основанные на принципах социального выбора (или голосования), они более экономны в вычислительном отношении [8, 9]. Наиболее известным из них является метод Борда, согласно которому в ранжировании каждого эксперта наиболее предпочтительный вариант занимает первое место и получает n баллов, следующий за ним по предпочтительности $n-1$ баллов и так далее, до конца списка. Коллективное ранжирование выражается в виде числа баллов, набранных каждым из вариантов по сумме индивидуальных ранжирований. В группе КЭО известен также метод Кондорсе, в котором для каждой пары альтернатив определяется, сколько экспертов предпочитает одну другой, и победителем становится альтернатива, побеждающая все остальные при парном сравнении. Другие существующие многочисленные методы социального выбора являются развитием или комбинацией методов Борда и Кондорсе. Недостатком этой группы методов формирования коллективного ранжирования являются известные «парадоксы голосования», которые выражаются, в частности, в возможном возникновении нетранзитивности результирующего ранжирования [8, 9].

Отдельную группу методов КЭО составляют методы многокритериального выбора, в частности очень популярный метод анализа иерархий (МАИ) (англ. analytic hierarchy process, АНР) Т. Саати, и его развитие — метод аналитических сетей [10, 11]. Эти методы более сложны для работы экспертов, поскольку каждый вариант необходимо сравнить с другими по конечному множеству критериев, в то время как в медианных методах и методах социального выбора варианты нужно просто упорядочить по предпочтительности (проранжировать). Соответственно, усложняется и обработка результатов экспертизы, осуществляемая на каждом уровне иерархического выбора. Кроме того, установлено, что МАИ имеет ряд недостатков, пробелов и ошибочных допущений [12, 13]. Главное здесь то,

что шкалы, в которых осуществляется оценивание степеней предпочтений вариантов по каждому из критериев, полагаются шкалами отношений, и притом не связанными друг с другом и с приоритетами критериев. Это допущение в свете математической теории измерений неправомерно. В [12, 13] представлены примеры, доказывающие, что МАИ, основанный на указанном допущении, может привести к явно ошибочным результатам.

Еще одной группой методов выбора, близких к КЭО, являются задачи Web-поиска, основанные на алгоритме PageRank и ему подобных [14, 15]. Эти методы достаточно успешно применяются для формирования многоагентных решений на базе оцениваемых вариантов с применением марковских моделей [16, 17], они обладают высоким быстродействием и лишены многих недостатков, присущих перечисленным методам КЭО. Web-поиск, основанный на марковских моделях, обычно связан с поиском стационарных состояний марковской цепи, расчетом спектра собственных чисел марковской матрицы, при котором часто требуется ее регуляризация [18, 19].

В настоящей работе представлен разработанный авторами метод обработки коллективной экспертной оценки, основанный на использовании цепи Маркова, что позволило упростить процедуру выбора рационального варианта и сократить время вычислений по сравнению с известными методами.

Разработка метода экспертного выбора на основе цепей Маркова

Рассмотрим метод коллективного выбора, основанный на модели марковской цепи. По определению, цепь Маркова — это последовательность случайных событий (дискретный случайный процесс) с конечным числом состояний, характеризующаяся тем, что при фиксированном настоящем состоянии будущее состояние не зависит от прошлого [20]. Процесс в каждый момент времени находится в одном из n состояний. При этом из состояния с номером i он перейдет в состояние j с вероятностью p_{ij} . Матрицу $\mathbf{P} = (p_{ij})_{n \times n}$ называют матрицей переходных вероятностей (переходов). Она является стохастической при выполнении следующих условий:

— $p_{ij} \geq 0$ (матрица неотрицательна);

— $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1$ (сумма элементов каждой строки матрицы равна единице).

Марковскую цепь можно представить в виде графа, в котором вершины — это состояния процесса, а дуги — переходы между состояниями.

Каждой дуге графа (i, j) соответствует вероятность перехода из i в j , то есть p_{ij} . Согласно марковской модели агрегирования экспертных предпочтений каждую альтернативу в ранжированиях можно представить как состояние марковской цепи, в процессе агрегирования индивидуальных предпочтений экспертов можно оценить вероятность переходов p_{ij} .

Марковский граф строится на основании матрицы переходов. Далее для его вершин рассчитывается число Коупленда (*CopelandNumb*), равное разности чисел дуг, входящих в вершину и выходящих из нее [21, 22], и альтернативы упорядочиваются в соответствии с убыванием числа Коупленда. По своему содержанию число Коупленда обобщает гипотезу Коупленда [22] о консенсусном ранжировании альтернатив по «количеству попаданий в конкурсы (индивидуальные ранжирования), которые они выиграли». В коллективном ранжировании альтернативы располагаются по убыванию числа Коупленда.

Сформулируем метод формирования коллективного ранжирования.

Входной информацией являются K индивидуальных ранжирований n вариантов, представленных K экспертами. Для каждого из K индивидуальных ранжирований строится матрица $Q_k = (q_k(i, j))_{n \times n}$ ($k = 1, \dots, K$) по правилу подсчета превосходства альтернатив в индивидуальных ранжированиях (подсчет «числа побед и проигрышей»):

$$q_k(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } j \succ i \text{ в } k\text{-м ранжировании;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

Из полученных матриц формируется суммарная матрица

$$Q = (q(i, j))_{n \times n} = \sum_k Q_k. \quad (2)$$

От матрицы Q осуществляется переход к матрице переходных вероятностей Маркова. Существует ряд правил перехода, мы воспользуемся так называемым правилом MC4 [8], согласно которому переходная матрица $P = (p(i, j))_{n \times n}$ формируется так:

$$p(i, j) = \begin{cases} 1/n, & \text{если } q(i, j) > q(j, i); \\ (n-m)/n, & \text{если } i = j; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (3)$$

На основании построенной матрицы переходов строится направленный марковский граф, вершины которого соответствуют сравниваемым альтернативам, а дугам приписываются соответствующие переходные вероятности. Сравнимые альтернативы упорядочиваются по убыванию числа Коупленда.

Применение разработанного метода для выбора программируемых логических микроконтроллеров

Рассмотрим применение предлагаемого метода для реальной экспертной оценки.

На предприятии ПКФ «Криопром» (г. Одесса) в рамках масштабного проекта по автоматизации блоков очистки промышленно выпускаемых воздушоразделительных установок [23] было принято решение о закупке крупной партии программируемых логических микроконтроллеров (ПЛМ). Изначально были выбраны пять альтернативных вариантов ($a-e$) ПЛМ:

- Siemens SIMATIC S7-300/200 (a);
- Moeller XC-100/200 (b);
- Advantech ADAM-5000/APAX-500 (c);
- Schneider Modicon M340/Modicon Quantum (d);
- ICPDAS XPAC-8000/LinPAC-8000/WinPAC-8000 (e).

Для коллективного консенсусного выбора лучшего варианта была сформирована группа из девяти экспертов — ведущих специалистов предприятия «Криопром» и ведущих преподавателей и инженеров Института компьютерных систем ОНПУ. Экспертам было предложено составить профили индивидуальных предпочтений альтернатив, принимая во внимание специфику автоматизации воздушоразделительных установок, а также такие характеристики ПЛМ как цена, быстродействие и диапазон средств для его программирования, определяющий универсальность применения ПЛМ. В результате экспертного оценивания был получен профиль, приведенный в табл. 1.

Для проверки согласованности мнений экспертов был рассчитан коэффициент конкордации Кэнделла [2]. Для этого был осуществлен

Таблица 1

Профиль индивидуальных предпочтений экспертов

Эксперт	Индивидуальные предпочтения
Э1	$c \succ e \succ d \succ b \succ a$
Э2	$c \succ e \succ d \succ b \succ a$
Э3	$c \succ e \succ b \succ d \succ a$
Э4	$c \succ e \succ d \succ b \succ a$
Э5	$e \succ c \succ d \succ a \succ b$
Э6	$e \succ d \succ c \succ a \succ b$
Э7	$e \succ c \succ d \succ a \succ b$
Э8	$b \succ e \succ d \succ c \succ a$
Э9	$d \succ b \succ e \succ c \succ a$

переход от таблицы предпочтений к матрице рангов $\mathbf{R} = (r_{ij})_{9 \times 5}$. В каждой строке матрицы предпочтений наилучшей альтернативе присваивается ранг $r(1) = 1$. Следующей за ней по предпочтительности альтернативе присваивается ранг $r(k) = r(k-1) + 1$.

Ранговая матрица выглядит следующим образом:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 5 & 4 & 1 & 3 & 2 \\ 5 & 4 & 1 & 3 & 2 \\ 5 & 3 & 1 & 4 & 2 \\ 5 & 4 & 1 & 3 & 2 \\ 4 & 5 & 2 & 3 & 1 \\ 4 & 5 & 3 & 2 & 1 \\ 4 & 5 & 2 & 3 & 1 \\ 5 & 1 & 4 & 3 & 2 \\ 5 & 2 & 4 & 1 & 3 \end{pmatrix}.$$

Дисперсионный коэффициент конкордации Кэнделла рассчитывается по формуле:

$$W = \frac{12S}{K^2(n^3 - n)}, \quad (4)$$

где S — оценка дисперсии;

K — количество экспертов;

n — число альтернатив.

Оценка дисперсии определяется как

$$S = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^K r_{ik} - \bar{r} \right)^2, \quad (5)$$

где k — индекс эксперта ($k = 1, 2, \dots, K$);

r_{ik} — значение ранга, присвоенного k -м экспертом i -й альтернативе;

$\bar{r}$ — оценка среднего значения рангов по альтернативам, определяемая как

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K r_{ik}. \quad (6)$$

Коэффициент конкордации равен 1, если все ранжирования экспертов в группе одинаковы, и равен 0, если все они различны. Для рассматриваемой экспертной табл. 1 коэффициент конкордации $W = 0,56$, что говорит о достаточно высокой согласованности индивидуальных ранжирований экспертов. Поскольку коэффициент конкордации есть случайная величина, распределенная по распределению χ^2 с числом степеней свободы $\nu = m-1$ при числе альтернатив $n > 7$, состоятельность ее статистической оценки проверена и подтверждена по χ^2 — критерию Пирсона с уровнем значимости 0,95.

Применим к табл. 1 описанный выше метод.

Матрицы $(\mathbf{Q}_k)_{5 \times 5}$ ($k = 1, \dots, 9$), рассчитанные по соотношению (1), имеют следующий вид:

$$\mathbf{Q}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Q}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{Q}_3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Q}_4 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{Q}_5 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Q}_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{Q}_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Q}_8 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix};$$

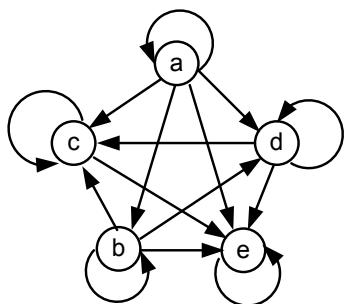
$$\mathbf{Q}_9 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Суммированием всех этих матриц получаем матрицу

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 0 & 6 & 9 & 9 & 9 \\ 3 & 0 & 7 & 8 & 7 \\ 0 & 2 & 0 & 2 & 5 \\ 0 & 1 & 6 & 0 & 7 \\ 1 & 3 & 5 & 2 & 0 \end{pmatrix}.$$

В соответствии с правилом (3) получаем матрицу переходных вероятностей

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1/5 \\ 0 & 2/5 & 1/5 & 1/5 & 1/5 \\ 0 & 0 & 4/5 & 0 & 1/5 \\ 0 & 0 & 1/5 & 3/5 & 1/5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$



Марковский граф для коллективного ранжирования

Марковский граф, построенный по матрице (7), приведен на **рисунке**. Вершины графа соответствуют состояниям марковской цепи (т. е. рассматриваемым альтернативам). Направленные дуги графа строятся в соответствии с вероятностями переходов в соответствующие состояния, указанными в матрице, — от менее вероятных состояний к более вероятным (или на языке бинарных отношений — от менее предпочтительных вариантов к более предпочтительным).

В **табл. 2** приведены числа Коупленда для вершин марковского графа (без учета циклических дуг, вносящих нулевой вклад), соответствующие альтернативным вариантам ПЛМ. Тогда в

Таблица 2

Числа Коупленда для вершин марковского графа

Вариант	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
Число Коупленда	−4	−2	2	1	4

соответствии с правилом Коупленда полученное итоговое ранжирование имеет вид: $e > c > d > b > a$.

Таким образом, согласно коллективной экспертной оценке предпочтительным является вариант *e*, т. е. для закупки рекомендуются микроконтроллеры ICPDAS XPAC-8000/ LinPAC-8000/ WinPAC-8000.

Для проверки состоятельности предложенного метода результаты экспертного опроса, приведенные в табл. 1, были обработаны с использованием комплекса Matlab-программ, основанных на решении задачи поиска медианы Кемени как задачи целочисленного программирования с использованием метода ветвей и границ [24]. Результаты обработки по предложенному методу и по методу медианы Кемени [24] полностью совпадают между собой.

Для решения задачи коллективного выбора по предложенному методу составлена программа в системе компьютерной алгебры Scilab. С

целью оценки ее быстродействия проведен вычислительный эксперимент со 150 синтезированными таблицами коллективных предпочтений, сгенерированными случайным образом. Эксперимент на программно-аппаратной платформе CPU: Intel Core i5 2450M 2,5 ГГц; RAM: 6 ГБ DDR3 1300 МГц; ОС: Win7 для числа альтернативных вариантов $n = 5 - 12$ и числа экспертов $K = 5 - 15$ показал, что процессорное время вычислений не превышает 35–80 мс, что в 80–200 раз меньше, чем при решении тех же задач в системе Matlab с использованием медианы Кемени [24].

Выводы

Изложенные результаты позволяют заключить, что предложенный метод может эффективно применяться при решении задач формирования коллективной экспертной оценки сложных компонентов систем автоматизации, например представленных на рынке программируемых логических микроконтроллеров. Как показал вычислительный эксперимент, метод обладает значительно более высоким быстродействием, чем известные аналоги, при этом он прост для программной реализации, поскольку основан на стандартных матричных операциях и сравнениях.

В дальнейших исследованиях будет решаться задача анализа такой ситуации, в которой допускается присвоение экспертом одинаковых рангов различным альтернативным вариантам.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пиганов М. Н., Подлипов Г. А. Экспертные оценки в управлении качеством радиоэлектронных средств. — Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева, 2004.
2. Самохвалов Ю. Я., Науменко Е. М. Экспертное оценивание. Методический аспект. — Киев: ДУИКТ, 2007.
3. Bury H., Wagner D. Application of Kemeny's median for group decision support // In book: Applied Decision Support with Soft Computing. Series: Studies in Fuzziness and Soft Computing. Vol. 124. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2003. — P. 235–262. — https://doi.org/10.1007/978-3-540-37008-6_10
4. Didehvar F., Eslahchi Ch. An algorithm for rank aggregation problem // Applied Mathematics and Computation. — 2007. — Vol. 189 (2). — P. 1847–1858. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2006.12.065>
5. Davenport A., Kalagnanam J. A computational study of the Kemeny Rule for preference aggregation proceeding // AAAI'04 Proc. of the 19th National Conference on Artificial Intelligence. — San Jose, California. — 2004. — P. 697–702.
6. Болтенков В. А., Куваева В. И., Позняк А. В. Анализ медианных методов консенсусного агрегирования ранговых предпочтений // Информатика та математичні методи в моделюванні. — 2017. — Т. 7, №4. — С. 307–317.

7. Гехман А. В., Якунин Ю. Ю., Даничев А. А., Володин А. А. Обработка результатов экспертиз в реестре научных технических разработок // Вестник сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. — 2010. — Вып. 6 (32). — С. 30–34.
8. Hannu Nurmi. Voting systems for social choice // In: Handbook of Group Decision. Advances in Group Decision and Negotiation. Vol. 4. — Springer: 2010. — P. 167–182. doi <http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-9097-3>
9. Петровский А. Б. Теория принятия решений. — Москва: Академия, 2009.
10. Saaty Th. L., Vargas L. G. Decision Making with the Analytic Network Process Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks. — N.-Y.: Springer Science+Business Media, 2013.
11. Саати Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. — Москва: ЛКИ, 2008.
12. Подиновский В. В., Подиновская О. В. О некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. — 2011. — № 1. — С. 8–13.
13. Подиновский В. В., Подиновская О. В. Еще раз о некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. — 2012. — № 2. — С. 75–78.
14. Langville A. N., Meyer C. D. Who's #1? The Science of Rating and Ranking. — Princeton and Oxford: Princeton University Press, 2013.
15. Dwork C., Kumar R., Noar M., Sivakumar D. Rank aggregation methods for the Web // In book: International Conf. on the World Wide Web. — ACM Press and Addison Wesley, 2001. — P. 613–622. — <http://dx.doi.org/10.1145/371920.372165>.
16. Patchmuthu, R. K., Goh, K. L. A., Singh, A. K. Application of Markov chain in the PageRank algorithm // Proc. of the 3rd CUTSE International Conference. — Miri, Sarawak, Malaysia: Curtin University, 2011. — P. 116–121.
17. Prerna Rai, Arvind Lal. Google PageRank algorithm: Markov chain model and hidden Markov model // Int. Journal of Computer Applications. — 2016. — Vol. 138, N 9. — P. 9–13. — <http://dx.doi.org/10.5120/ijca2016908942>
18. Polyak B. T., Timonina A. V. PageRank: New regularizations and simulation models // IFAC Proceedings Volumes. — 2011. — Vol. 44, iss. 1. — P. 11202–11207. — <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01870>
19. Nesterov Y., Nemirovski A. Finding the stationary states of Markov chains by iterative methods // Applied Mathematics and Computation. — N 255. — P. 58–65. — <https://doi.org/10.1016/j.amc.2014.04.053>
20. Турчин В. Н., Турчин Е. В. Марковские цепи. Основные понятия, примеры, задачи. — Днепропетровск: LizunoffPress, 2016.
21. Вольский В. И. Процедуры голосования в малых группах с древнейших времен до начала XX века: препринт WP7/2014/02. — Москва: Изд. дом Высшей школы экономики, 2014.
22. Dixit A. K., Skeath S., Reiley Jr. D. H. Games of Strategy. — N.-Y., London: W. W. Norton & Company, 2014.
23. Червоненко П. П., Болтенков В. А. Підвищення рівня автоматизації блоку очищення установки розділення повітря // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. — 2016. — Т. 8, № 1. — С. 28–32.
24. Compute the median ranking according to the Kemeny axiomatic approach [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/52235-compute-the-median-ranking-according-to-the-kemeny-axiomatic-approach> (Дата обращения: 30.03.2018).

Дата поступления рукописи
в редакцию 03.04 2018 г.

В. О. БОЛТОНКОВ, В. І. КУВАЄВА, П. П. ЧЕРВОНЕНКО

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

МЕТОД ЕКСПЕРТНОГО ВИБОРУ ЦИФРОВИХ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМ ПРОМИСЛОВОЇ АВТОМАТИКИ НА ОСНОВІ МАРКІВСЬКОЇ МОДЕЛІ

Експертна оцінка і обґрунтований вибір цифрових компонентів на ринку мікроелектроніки є складною і відповідальною задачею. Для її вирішення відомі методи проведення експертиз підходять не в повній мірі в зв'язку з трудомісткістю обробки результатів. Розробка методу експертного вибору цифрових компонентів, що дозволяє швидко отримувати узагальнену колективну експертну оцінку (КЕО), оцінювати узгодженість думок експертів і приймати обґрунтовані рішення, є достатньо актуальною.

Задача дослідження – розробка методу формування КЕО для вибору цифрових компонентів систем промислової автоматики на основі ланцюга Маркова і його перевірка в реальній практичній ситуації. Запропоновано метод формування КЕО складних компонентів систем автоматики на основі марківської моделі. При агрегуванні експертних переваг кожна альтернатива представляється як стан марківського ланцюга. Далі для вершин марківського графа розраховується число Коупленда, дорівнює різниці числа дуг, що входять в вершину і виходять з неї. У колективному ранжируванні альтернативи розташовуються по спадаючому значенню числа Коупленда.

Розроблений метод продемонстрував високу швидкодiю в порiвняннi з вiдомими аналогами. Правильнiсть запропонованого методу, його працездатнiсть i швидкодiя пiдтвердженi на реальнiй експертизи i в процесi комп'ютерного моделювання.

Проведенi дослідження показали, що розроблений метод формування колективної експертної оцiнки працює в 80-200 разiв швидше, нiж метод КЕО на основi медiани Кеменi. Практична значимiсть запропонованого методу продемонстрована на реальнiй експертизи, проведений на пiдприємствi «Крiопром» (м.Одеса, Україна) при закупiвлi партii програмованих логiчних мiкроконтролерiв в рамках масштабного проекту по автоматизацiї блокiв очистки повітророзподiльних установок, що промислово випускаються.

Ключові слова: програмований логічний мікроконтролер, промислова автоматика, експертне оцінювання, колективне ранжування, рангова шкала, марківський ланцюг.

DOI: 10.15222/TKEA2018.2.21
UDC 519.816:004.33(035)

V. A. BOLTENKOV, V. I. KUVAlEVA, P. P. CHERVONENKO

Ukraine, Odessa National Polytechnic University
E-mail: vaboltlenkov@gmail.com

METHOD FOR EXPERT CHOISE OF INDUSTRIAL AUTOMATION DIGITAL COMPONENTS ON THE BASIS OF MARKOV'S MODEL

Expert evaluation and reasonable selection of digital components in the microelectronic market is a complex and responsible task. For its solution, the known methods of carrying out expert estimations do not fit fully in connection with the laboriousness of the results processing. The development of an expert choice method for digital components that allows you to quickly obtain a generalized collective expert evaluation (CEE), evaluate the consistency of expert opinions and make informed decisions is a quite actually.

The goal of the study is to develop a method for forming a voucher for the selection of digital components of industrial automation systems based on the Markov chain and its verification in the real practical situation. A method is proposed for CEE forming for complex components of automation systems based on the Markov model. When aggregating expert preferences, each alternative is represented as a state of the Markov chain. Next, for the vertices of a Markov graph, the Copeland number is calculated, equal to the difference between the number of arcs entering and leaving the vertex. In collective ranking, alternatives are arranged in descending Copeland numbers.

The developed method has a high speed in comparison with the known analogs. The correctness of the proposed method, its efficiency and speed has been confirmed by real expertise and in the process of computer modeling. The executed researches showed that the developed method for the collective expert evaluation forming works 80-200 times faster than the method based on the median Kemeni. The practical significance of the proposed method has been demonstrated on the real expertise carried out at the enterprise «Krioprom» (Odessa, Ukraine) when purchasing a batch of programmable logic microcontrollers within the large-scale project framework for cleaning units automation of industrial air-separation plants.

Keywords: programmable logic microcontroller, industrial automation, expert estimation, collective ranking, rank scale, Markov chain.

REFERENCES

1. Piganov M.N., Podlipnov G.A. *Ekspertnye otsenki v upravlenii kachestvom radioelektronnykh sredstv* [Expert assessments in the management of the quality of radio electronic means]. Samara State Aerospace University, 2004, 122 p. (Rus)
2. Samohvalov Yu.Ya., Naumenko E.M. *Ekspertnoe otsenivanie. Metodicheskii aspekt* [Expert estimation. Methodical aspect]. Kiev, DUCT, 2007, 262 p. (Rus)
3. Bury H., Wagner D. Application of Kemeny's median for group decision support. In: Yu X., Kacprzyk J. (eds) *Applied Decision Support with Soft Computing. Studies in*

Fuzziness and Soft Computing, Springer, Berlin, Heidelberg, 2003, vol. 124, pp. 235-262. https://doi.org/10.1007/978-3-540-37008-6_10

4. Didehvar F., Eslahchi Ch. An Algorithm for rank aggregation problem. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, vol. 189(2), pp. 1847-1858. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2006.12.065>

5. Davenport A., Kalagnanam J. A computational study of the Kemeny rule for preference aggregation proceeding. *AAAI'04 Proceedings of the 19th National Conference on Artificial Intelligence*. San Jose, California, 2004, pp. 697-702.

6. Boltenkov V.A., Kuvaeva V.I., Pozniak A.V. [Analysis of median methods for consensus rank preferences aggregation]. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*, 2017, vol. 7, no. 4, pp. 307-317. (Rus).
7. Gehman A.V., Iakunin Iu.Iu., Danichev A.A., Volodin A.A. [Processing of the results of examinations in the register of scientific and technical developments]. *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Ajerokosmicheskogo Universiteta Imeni Akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University], 2010, iss. 6 (32), pp. 30-34. (Rus).
8. Hannu Nurmi. Voting Systems for Social Choice. In: *Handbook of Group Decision. Part of the Advances in Group Decision and Negotiation book series* (AGDN, vol. 4). Springer, 2010, pp. 167-182. doi <http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-9097-3>
9. Petrovskiy A.B. *Teoriya prinyatiya reshenii* [The theory of decision-making]. Moscow, Academy, 2009, 400 p. (Rus).
10. Saaty T. L., Vargas L. G. *Decision Making with the Analytic Network Process Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*, N.-Y., Springer Science+Business Media, 2013, 363 p.
11. Saaty T. L. *Prinyatie reshenii pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh: Analiticheskie seti* [Decision making with dependence and feedback: The analytic network process], Moscow, LKI Ed., 2008, 360 p. (Rus)
12. Podinovskiy V.V., Podinovskaya O.V. [On the incorrectness of the analytic hierarchy process]. *Control Sciences*, 2011, no. 1, pp. 8-13. (Rus)
13. Podinovskiy V.V., Podinovskaya O.V. [Once again about the incorrectness of the analytic hierarchy process]. *Control Sciences*, 2012, no. 2, pp. 75-78. (Rus).
14. Langville A. N., Meyer C. D. Who's #1? *The Science of Rating and Ranking*, Princeton and Oxford, Princeton University Press, 2013, 247 p.
15. Dwork C., Kumar R., Noar M., Sivakumar D. Rank aggregation methods for the Web. In book: *Int. Conf. on the World Wide Web*, ACM Press and Addison Wesley, 2001, pp. 613-622. <http://dx.doi.org/10.1145/371920.372165>.
16. Patchmuthu, R.K., Goh, K.L.A., Singh, A.K. 2011. Application of Markov chain in the PageRank algorithm. In: *Proc. of the 3rd CUTSE International Conference*, Miri, Sarawak, Malaysia: Curtin University, 2011, pp. 116-121.
17. Perna Rai, Arvind Lal. Google PageRank algorithm: Markov chain model and hidden Markov model. *Int. Journal of Computer Applications*, 2016, vol. 138, no. 9, pp. 9-13. <http://dx.doi.org/10.5120/ijca2016908942>
18. Polyak B. T., Timonina A. V. PageRank: New regularizations and simulation models. *IFAC Proceedings Volumes*, 2011, vol. 44, iss. 1, pp.11202-11207. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01870>
19. Nesterov Y., Nemirovski A. Finding the stationary states of Markov chains by iterative methods. *Applied Mathematics and Computation*, no. 255, pp. 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2014.04.053>
20. Turchin V.N., Turchin E.V. *Markovskie tsepi. Osnovnye ponyatiya, primery, zadachi* [Markov Chains. Basic Concepts, Examples, Tasks]. Dnepropetrovsk, Lizun off Press, 2016, 196 p. (Rus).
21. Volskiy V. I. *Protsedury golosovaniya v malykh gruppakh s drevneishikh vremen do nachala XX veka* [Voting Procedures in Small Groups from Ancient Times to the Beginning of the 20th Century]. Preprint WP7 / 2014/02, Moscow, Publ. House of Higher School of Economics, 2014, 76 p. (Rus).
22. Dixit A. K., Skeath S., Reiley D. H. Jr. *Games of Strategy*, N.-Y., London, W. W. Norton & Company, 2014, 768 p.
23. Chervonenko P. P., Boltenkov V. A. Increasing the level of automation of the air purification device in the air separation unit. *Automation of Technological and Business Processes*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 28-32. (Ukr)
24. Compute the median ranking according to the Kemeny axiomatic approach [Electronic resource]. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/52235-compute-the-median-ranking-according-to-the-kemeny-axiomatic-approach> (date of the application: 30.03.2018).

Описание статьи для цитирования:

Болтенков В. А., Куваева В. И., Червоненко П. П. Метод экспертного выбора цифровых компонентов систем промышленной автоматизации на основе марковской модели. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 2, с. 21—28. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.21>

Cite the article as:

Boltenkov V. A., Kuvaeva V. I., Chervonenko P. P. Method for expert choice of industrial automation digital components on the basis of markov's model. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 2, pp. 21-28. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.21>

Dr. Sc. I. M. VIKULIN¹, Ph. D. V. N. LITVINENKO²,
Ph. D. S. V. SHUTOV³, A. I. MARONCHUK³, A. N. DEMENSKIY³, V. I. GLUKHOVA²

Ukraine, ¹Odessa National Academy of Telecommunications named after A. S. Popov;

²Kherson National Technical University;

³Kiev, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine

E-mail: shutov_sv@isp.kiev.ua

ENHANCING PARAMETERS OF SILICON VARACTORS USING LASER GETTERING

The authors investigate how and why defects influence the inverse characteristics of varactors. The paper presents experimental results on the effect laser gettering has on the electrical parameters of varactors. The mechanisms of the laser gettering effect on the parameters of varactors are analyzed.

Keywords: varactor, silicon, impurities, gettering, reverse current.

Varactors are widely used in radio electronics as variable capacitor diodes, the capacitance value of which is controlled by voltage [1–3]. The main parameters of the varactor are its Q-factor, nominal capacitance, reverse current and capacitance overlap ratio. The latter determines the frequency range of the varactor [1]. The development of varactors with a reverse gradient of the impurity concentration in the base makes it possible to significantly increase the capacitance overlap ratio. At the same time, another problem arises: such varactors have a low yield due to variance in nominal capacitance in the structures over the area of the plate, and to a high level of reverse currents. As studies have shown, this is mainly caused by structural defects and uncontrolled impurities in the active regions of the diodes [4–6].

Various gettering methods are used to reduce the density of structural defects in silicon [7–10]. Despite the variety of gettering methods of structural-impurity defects, many of them (e.g., mechanical introduction of defects into the back of the plate using abrasive treatment) are not technologically efficient, which makes it difficult to apply them in production. Therefore, a very topical issue is the development of effective technological methods for gettering structural defects and impurities in silicon.

This work is devoted to the study of how structural defects effect the parameters of the silicon varactor with the inverse gradient of impurity concentration in the base, and to the possibility of using laser gettering to improve the parameters and the yield of varactors.

Test samples

The investigated varactors were produced using the standard planar-epitaxial technology [11] and based on *n*-type silicon epitaxial structures with a specific resistance of 12 Ω·cm and a thickness of

8 μm, grown on silicon substrates oriented along the (111) plane.

Varactor structures were manufactured according to the following main technological operations:

- thermal oxidation of silicon wafers in water vapor at a temperature $T = 1050^\circ\text{C}$ for 100 minutes, followed by annealing in argon for 30 minutes at the oxidation temperature;

- 1st photolithography for opening windows in silicon dioxide;

- phosphorus ion implantation at a doping dose of 35 μC/cm² and phosphorus diffusion at a temperature of 950°C for 55 minutes to create a reverse concentration gradient;

- 2nd photolithography for opening windows for boron diffusion;

- boron doping in argon and oxygen at $T = 980^\circ\text{C}$ for 25 minutes to form a *p–n* junction;

- 3rd photolithography for opening windows in a borosilicate glass film;

- formation of the ohmic contact on the working side of the plate by depositing an aluminum film in vacuum, and the 4th photolithography on an aluminum film followed by annealing the contact in an inert medium at $T = 500^\circ\text{C}$;

- polishing the back side of the plate and forming an ohmic contact on it by successive deposition of titanium and nickel layers using the vacuum thermal evaporation method, and deposition of gold using galvanic precipitation.

Investigation of structural defects

Tests of the faulty (according to the reverse current parameter) varactor structures showed a high density of oxidative stacking faults (**OSF**) in their active regions. After each high-temperature operation, metallographic tests of the crystal structure were performed. To reveal structural defects, selective etching was carried out using the Sirtl etch during 10 to 180 s. The type of structural

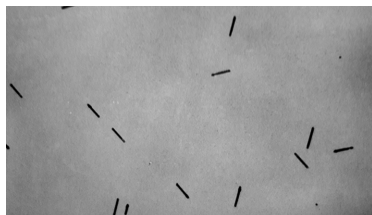


Fig. 1. Surface of the varactor structure with revealed OSFs

defects and their density were determined using an MMY-3 (MMU-3) optical microscope.

Immediately after thermal oxidation of silicon, OSFs with a density of up to $10^2 - 10^3 \text{ cm}^{-2}$ were found in the varactor structures, and after the last high-temperature operation (boron doping), the density reached $10^5 - 10^6 \text{ cm}^{-2}$.

Fig. 1 shows a microphotography of the surface of one of the tested structures after selective etching in a Sirtl etch for 20 s.

Gettering technology

To select an effective gettering method, which would seamlessly fit into the manufacturing route for the varactor, several gettering methods were tested. It is worth noting, that gettering should be done at the very beginning of the varactor manufacturing route [9, 12], i.e., before thermal oxidation, during which, as indicated above, OSFs already begin to form. The obtained experimental data have shown that an effective method of suppressing OSFs would be to use laser gettering in order to create a gettering area with an inverse concentration gradient of the impurity in the base on the back of the plate [13].

The getter region was formed by processing the back of the plate with a laser at a radiation density of 12 J/cm^2 followed by annealing in argon (140 L/h) and oxygen (10 L/h) at 1050°C for 40 min. Silicon wafers were processed by an LTN-102 type Nd laser [7, 14] with a radiation wavelength of $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$. The surface scanning speed of the laser beam was 0.5 m/s . The wafers were processed with continuous laser radiation in the heat flux regime, which ensured the melting of silicon without evaporation.

Laser processing causes tensile stresses to appear in the silicon wafer [7]. Subsequent heat treatment in argon and oxygen leads to recrystallization of the back surface of the plate, where a dislocation network is formed in the region processed by laser radiation. The regions of the crystal lattice disturbance on the non-working side of the plate serve as a drain for point vacancy defects and atoms of rapidly diffusing metal impurities [9, 12]. Since the diffusion coefficients of these defects are several orders of magnitude higher than those of such dopant impurities as boron, phosphorus or antimony, during heat treatment they migrate through the semiconductor wafer and are deposited on structural defects in the layer with a broken crystal lattice.

Testing the effectiveness of the developed technology

To test the approach, four batches of varactors were produced using the basic technology (without gettering) and four more batches were made according to the developed technology (using laser gettering). The efficiency of the technology was evaluated by the varactor structures yield according to two parameters:

- reverse current I_{rev} (validity criterion: $I_{\text{rev}} = 0,2 \mu\text{A}$ at 16 V reverse voltage);
- nominal capacity C_{nom} (validity criterion: $C_{\text{nom}} = 510 - 608 \text{ pF}$ at 1 V reverse voltage).

It is obvious that the yield percentage is inversely proportional to the variance of the C_{nom} values over the area of the plate.

The analysis of the data from the **table** shows that using the developed varactor manufacturing technology makes it possible to increase the structures yield by an average of 7.5% according to the reverse current parameter, and by 7.3% according to the nominal capacity parameter. At the same time, the level of reverse currents in the structures made by the developed technology is 2–5 times lower than for the ones manufactured using the basic technology. The variance of the C_{nom} values over the area of the plate is also lower.

Dependence of the structures yield on their manufacturing technology according to the reverse current and the nominal capacitance values

Manufacturing technology	Batch number	Yield, %
<i>I_{rev} control</i>		
Basic	1	91
	2	89
Developed	3	97
	4	98
<i>C_{nom} control</i>		
Basic	5	42,1
	6	43,8
Developed	7	48,5
	8	51,9

Metallographic studies performed before the formation of ohmic contacts on the working side of the plates showed that the structures manufactured using the developed technology contain no OSFs.

Fig. 2 shows reverse branches of the current-voltage characteristics of the varactors. It can be seen from the figure, that gettering substantially reduces the level of the reverse currents in the diodes.

The effect of the laser-created getter layer on the parameters of the varactor structure can be

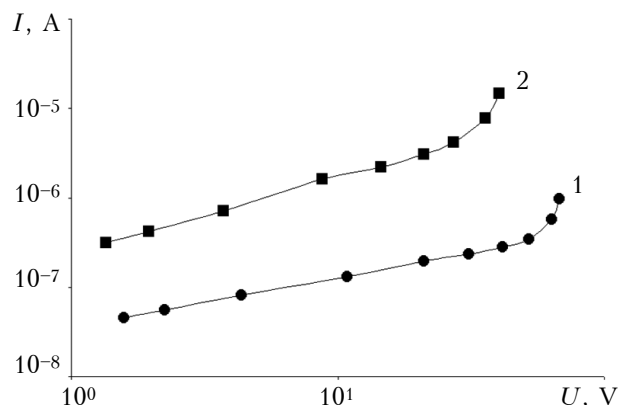


Fig. 2. Current-voltage characteristics of the varicap structures made using laser gettering (1) and the basic technology (2)

explained as follows. During high-temperature operations (thermal oxidation, phosphorus diffusion, boron diffusion), an effective gettering of metal impurities is carried out by the getter layer created on the back of the plate. The nuclei of structural defects that were formed during ingot growth and during epitaxy are removed, which to a great extent prevents forming new defects and helps removing the OSFs already formed in silicon. The interstitial silicon atoms that form OSFs diffuse to the created getter region and are captured by it.

As a result, the previously formed OSFs decrease in size or disappear completely. Effective gettering of metal impurities and structural defects provides a significant reduction in the variance of the nominal capacitance of varactor structures over the area of the plate (due to a more uniform diffusion of phosphorus over the plate area during the formation of an inverse concentration gradient of the impurity in the base of the varactor structure and a more planar boron diffusion front when creating the $p-n$ junction), as well as a significant decrease in the level of reverse currents in varactors, the increase of which was caused by defects.

Conclusion

Thus, oxidative packing defects formed in the active regions of the structures are the reason for the low yield of varactors with an inverse gradient of the impurity concentration in the base according to the reverse current and the nominal capacity parameters. The use of the developed technology for manufacturing varactor structures with laser gettering allows preventing or significantly decreasing the OSF density in the active regions of the structures. This makes it possible to reduce the level of reverse currents and to decrease the variance of the nominal capacitance of varactors over the area of the plate and, thus, to improve the devices yield.

REFERENCES

1. Vikulin I. M., Stafeev V. I. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov* [Physics of semiconductor devices]. Moscow, Radio i Svyaz', 1990, 264 p. (Rus)
2. Timoshenkov S. P., Boyko A. N., Gaev D. S., Kalmykov R. M. [Integrated high-capacity varactor based on porous silicon]. *Izvestiya vuzov. Elektronika*, 2017, vol. 22, no. 1, pp. 15-19. (Rus)
3. Savchenko M. P., Starovoitova O. V. [Negative feedback circuit by noise for an autogenerator with varactors]. *Vestnik Baltiiskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Ser.: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 2, pp. 66-69. (Rus)
4. Khorosheva M. A., Kveder V. V., Seibt M. On the nature of defects produced by motion of dislocations in silicon. *Physica Status Solidi A*, 2015, vol. 212, iss. 8, pp. 1695-1703. <https://doi.org/10.1002/pssa.201532153>
5. Kveder V., Khorosheva M., Seibt M. Interplay of Ni and Au atoms with dislocations and vacancy defects generated by moving dislocations in Si. *Solid State Phenomena*, 2016, vol. 242, pp. 147-154. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.242.147>
6. Loginov Yu. Yu., Mozherin A. V., Brilikov A. V. [Effect of elastic stresses on the formation of structural defects in semiconductors]. *Vestnik SibGAU*, 2013, no. 2(48), pp. 198-200. (Rus)
7. Pilipenko V. A., Gorushko V. A., Petlitskiy A. N., Ponaryadov V. V., Turtsevich A. S., Shvedov S. V. [Methods and mechanisms of gettering of silicon structures in the production of integrated circuits]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2013, no. 2-3, pp. 43-57. (Rus)
8. Klimanov E. A. [Mechanism of gettering the generation-recombination centers in silicon at diffusion of phosphorus and boron]. *Uspekhi prikladnoi fiziki*, 2015, vol. 3, no. 2, pp. 121-125. (Rus)
9. Litvinenko V. N., Bohach N. V. [Defects and impurities in silicon and their gettering methods]. *Visnik KhNTU*, 2017, no. 1(60), pp. 32-42. (Rus)
10. Grafutin V. I., Prokop'ev E. P., Timoshenkov S. P. Gettering and synergetic approaches to the problem of silicon and silicon-based materials. Review. *Nanotechnology Research and Practice*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 4-26. <https://doi.org/10.13187/ejnr.2014.1.4>
11. Kurnosov A. I., Yudin V. V. *Tekhnologiya proizvodstva poluprovodnikovyykh priborov i integral'nykh mikroskhem* [Fabrication technology of semiconductor devices and integrated circuits]. Moscow, Vysshaya Shkola, 1986, 368 p. (Rus)
12. Ravi K. V. *Imperfections and impurities in semiconductor silicon*. New York, John Wiley & Sons, 1981, 379 p.
13. Litvinenko V. M. *Sposib vivotovlenniya struktur varikapu zi zvorotnim gradiyentom kontsentratsiyi domishki v bazi* [Method of manufacturing varactor structures with an inverse gradient of impurity concentration in the base]. Pat. Ukr., no. 113351, 2017. (Ukr)
14. Bokhan Yu. I., Kamenkov V. S., Tolochko N. K. Dominant factors of the laser gettering of silicon wafers. *Semiconductors*, 2015, vol. 49, iss. 2, pp. 270-273. <https://doi.org/10.1134/S1063782615020050>

Received 12.04 2018

DOI: 10.15222/TKEA2018.2.29
UDC 621.382.28

Д. ф.-м. н. І. М. ВІКУЛІН¹, к. т. н. В. М. ЛИТВИНЕНКО²,
к. т. н. С. В. ШУТОВ³, О. І. МАРОНЧУК³,
О. М. ДЕМЕНСЬКИЙ³, В. І. ГЛУХОВА²

Україна, ¹Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова;
²Херсонський національний технічний університет України;
Київ, ³Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
E-mail: shutov_sv@isp.kiev.ua

ПОЛІПШЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КРЕМНІЄВИХ ВАРИКАПІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЛАЗЕРНОГО ГЕТЕРУВАННЯ

Варикапи широко використовуються в радіoeлектроніці як змінна ємність, величина якої управляється напругою. Основними параметрами варикапа є його добротність, номінальна ємність, зворотний струм і коефіцієнт перекриття по ємності, який визначає частотний діапазон використання варикапа. Розробка варикапів зі зворотним градієнтом концентрації домішки в базі дала можливість значно збільшити коефіцієнт перекриття по ємності. При цьому, однак, виникла проблема, пов'язана з низьким виходом придатних приладів через розкид значень номінальної ємності структур по площі пластини, а також високого рівня їх зворотних струмів.

Робота присвячена дослідженню впливу структурних дефектів на параметри кремнієвого варикапа зі зворотним градієнтом концентрації домішки в базі і можливості застосування лазерного гетерування для поліпшення його параметрів і підвищення виходу придатних приладів.

Встановлено, що головною причиною низького відсотка виходу придатних досліджуваних варикапів є окислювальні дефекти упакування (ОДУ), що утворюються в активних областях структур в процесах проведення високотемпературних операцій. Детально розглянута запропонована технологія виготовлення структур варикапів з лазерним гетеруванням, а також особливості створення області гетера на зворотному боці пластин. Приведено експериментальні результати досліджень впливу лазерного гетерування на електричні параметри варикапів. Показано, що застосування розробленої технології дозволяє запобігти або істотно зменшити щільність ОДУ в активних областях структур, що дає можливість знизити рівень зворотних струмів і зменшити розкид значень номінальної ємності варикапів по площі пластини і, як наслідок, підвищити вихід придатних приладів

Ключові слова: гетерування, зворотний струм, кремній, домішки, варикап.

Д. ф.-м. н. І. М. ВІКУЛІН¹, к. т. н. В. Н. ЛИТВИНЕНКО²,
к. т. н. С. В. ШУТОВ³, А. І. МАРОНЧУК³, А. Н. ДЕМЕНСКИЙ³, В. І. ГЛУХОВА²

Україна, ¹Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова;
²Херсонский национальный технический университет;
г. Киев, ³Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарьова НАН Украины
E-mail: shutov_sv@isp.kiev.ua

УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЕВОГО ВАРИКАПА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЛАЗЕРНОГО ГЕТТЕРИРОВАНИЯ

Работа посвящена исследованию влияния структурных дефектов на параметры кремниевого варикапа с обратным градиентом концентрации примеси в базе и возможности применения лазерного геттерирования для улучшения его параметров и повышения выхода годных приборов.

Установлено, что главной причиной низкого процента выхода годных исследуемых варикапов являются окислительные дефекты упаковки (ОДУ), образующиеся в активных областях структур в процессах проведения высокотемпературных операций. Подробно рассмотрена предложенная технология изготовления структур варикапов с лазерным геттерированием, а также особенности создания области геттера на обратной стороне пластин. Приведены экспериментальные результаты исследований влияния лазерного геттерирования на электрические параметры варикапов. Показано, что применение разработанной технологии позволяет предотвратить или существенно уменьшить плотность ОДУ в активных областях структур, дает возможность снизить уровень обратных токов и уменьшить разброс значений номинальной емкости варикапов по площади пластины и, как следствие, повысить выход годных приборов

Ключевые слова: геттерирование, обратный ток, кремний, примесь, варикап.

Cite the article as / Описання статті для цитування:

Vikulin I. M., Litvinenko V. N., Shutov S. V., Maronchuk A. I., Demenskiy A. N. Enhancing parameters of silicon varicaps using laser gettering. Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature, 2018, no. 2, pp. 29-32. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.29>

Ph.D. V. E. TROFIMOV, Ph.D. A. L. PAVLOV, Y. G. MAMYKIN

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

CAD/CAE METHOD OF SOLVING THE HYDRODYNAMIC PROBLEM WHILE DEVELOPING POWERFUL ELECTRONIC DEVICES

The article presents examples of the solution of the hydrodynamic problem that arises in the development of powerful electronic devices requiring liquid cooling using the CAD/CAE modeling method. The authors consider poorly documented or undocumented features of such solution based on the use of free software packages – SALOME, OpenFOAM and ParaView for the CAELinux operating system platform.

Keywords: liquid cooling of electronic devices, CAD/CAE-modeling, CAELinux, SALOME, OpenFOAM, ParaView.

While designing electronic devices, the need to solve the hydrodynamic problem arises in the case when, in order to ensure a given thermal regime of electronic components, it is necessary to use forced liquid cooling realized as coolers of a particular design. For a developer of electronic devices, the end result of solving the hydrodynamic problem is not so much an estimate of the flow velocity and liquid flow rate in the cooler as the choice of a pump capable of overcoming the hydrodynamic resistance of the cooler and providing the velocity and flow rate with given values obtained during thermal calculations. It is not difficult to choose the pump parameters when the hydrodynamic characteristic is known for the cooler, i.e. the dependence of the liquid pressure drop at the inlet of the cooler versus the flow rate or velocity of the liquid flowing through it. With streamlined flow, when the hydrodynamic resistance of the cooler is determined by frictional forces, the relationship between the pressure drop and the velocity of the liquid is expressed by the Darcy's law [1], which, taking into account the hydrodynamic resistance at the inlet to the cooler and at the outlet from it, is represented by the well-known equation [2]

$$\Delta p = \left[\xi_{\text{in}} + \lambda \left(\frac{l}{d} \right) + \xi_{\text{out}} \right] \frac{\rho V^2}{2}, \quad (1)$$

where Δp – pressure drop of the coolant at the cooler inlet and at its outlet;

$\xi_{\text{in}}, \xi_{\text{out}}$ – coefficients of hydrodynamic resistance at the inlet and outlet of the cooler, respectively;

λ – coefficient of hydrodynamic resistance (friction) along the length l ;

l – length of the coolant flow path in the cooler;
 d – characteristic cooler size;
 ρ, V – density and liquid velocity in the cooler, respectively.

The seeming simplicity of this equation conceals considerable difficulties in determining the coefficients of hydrodynamic resistance it includes. Known analytical dependencies providing satisfactory results for practical applications are obtained for coolers in which the flow of liquid occurs in rectilinear channels of regular shape (circular or rectangular cross-section) [3]. For cases when there are some form of obstructions in the coolant channels, local constrictions, extensions and rotations, the equations for calculating are empirical or semi-empirical, are oriented to concrete design solutions and have a strictly limited field of application [3, 4].

The trend to complicate the design of coolers due to the realization in them of nontraditional flows [5 – 10] makes it impossible to use equation (1) for practical calculations and requires the use of other approaches. One of them is mathematical modeling, which implements the following algorithm for solving the hydrodynamic problem [7]:

- to develop a 3D geometric model, the composition, shape, dimensions and applied materials of which adequately reflect the design of the cooler;
- to determine the distribution of flow velocity and fluid pressure in the geometric model of the cooler by solving within its boundaries the system of nonstationary three-dimensional continuum and Navier–Stokes equations with allowance for the specified hydrodynamic effects, using the finite element method;

— to present the results of the solution in a form convenient for their interpretation and subsequent intellectual analysis (tables, graphs, diagrams, visualization and animated pictures).

Obviously, from the point of view of the developer of electronic devices, implementing such an algorithm should not be about writing their own computational procedures in any algorithmic language, but about the use of specialized software related to CAD/CAE systems.

Today there is a variety of such software. There is a classification of the selection criteria for the software specifying the features and main characteristics of each criterion [11]. However, the fundamental requirement to use exclusively legal software in the design process takes the proprietary criterion to the first place.

It is known that proprietary CAD/CAE systems have owners who provide chargeable control over systems development, distribution, modification and use. For this reason, the functionality and reliability of proprietary CAD/CAE systems are not questioned. Such software for solving the hydrodynamic problem includes, for example, ANSYS CFX, SolidWorks, Elmer. Its use requires the purchase of a license, the cost of which reaches the price of a small economy car.

An alternative to proprietary are free CAD/CAE systems, which are considered to be less functional and less reliable software. However, our experience of its successful use in the design of sufficiently complex coolers [5–10] allows us to conclude that this judgment is wrong.

To solve the hydrodynamic problem, the developer can use free software, such as the SALOME geometric modeling system [12], the OpenFOAM mathematical modeling system [13], and the ParaView parallel computing visualizer [14]. The SALOME tools allow you to create a virtual 3D geometric model of the cooler and generate its finite-element representation (meshing). OpenFOAM solvers (functions in terms of C++) allow you to import from SALOME a meshed model of the cooler, set the initial and boundary conditions for the problem, and solve the above-mentioned equations of mathematical physics within the finite element model.

The solution obtained is an array of numerical values in nodes of the meshed model, the number of which can reach 10^5 – 10^6 . ParaView functions allow using this array of values to determine the hydrodynamic characteristic of the cooler and to present it in the form of a table, a two-dimensional graph, a three-dimensional diagram, a visualization picture of the change in pressure and velocity in space, and an animated picture of their change in time.

Thus, these software packages interact with each other by transmitting the information about

the cooler from SALOME to OpenFOAM and then to ParaView, and together they form a CAD/CAE system that implements the above algorithm for solving the hydrodynamic problem. This system is a complete analog of known proprietary systems, without any loss of functionality.

One of the main obstacles to the active use of SALOME, OpenFOAM and ParaView for solving the hydrodynamic problem is their weak documentation. Official user manuals from developers [12–14] help mastering the basic techniques using the simplest examples, which are far from the real designs of coolers. Known applications of this software repeat the main declarations of official manuals and are focused on solving other problems for other modeling objects [15–17].

The goal of this paper is to show practical examples of undocumented or poorly documented features of using this CAD/CAE system for the solution of the hydrodynamic problem based on the experience of designing liquid coolers for such electronic devices as microprocessors. SALOME, OpenFOAM and ParaView are cross-platform software products and can run under different operating systems. However, the rational approach is to use them on the CAELinux operating system platform [18] for several reasons: first, it corresponds to the spirit of free software; secondly, the installation distribution of CAELinux already includes these software packages, which eliminates the need for additional settings to ensure the correct transmission of information between the packages.

Example 1

Fundamentals of solving the hydrodynamic problem by the CAD/CAE method

Let us consider a water cooler used for thermal management of the Intel Core i7 microprocessor. The cooler is a closed rectilinear channel with rectangular cross section, whose base is in direct thermal contact with the pedestal of the microprocessor body, serving for heat removal (**Fig. 1, a**). The flow volume of the cooler is a parallelepiped, symmetric with respect to the plane parallel to the YOZ plane (**Fig. 1, b**), with the following parameters: width $X = 60$ mm, height $Y = 15$ mm and length $Z = 70$ mm. Water flows along the Z axis at a temperature of 20°C , the water velocity at the cooler inlet is $U = 0.01$ m/s.

It is required to determine the pressure drop of water at the inlet to the cooler using the icoFoam solver, which is designed to solve the above equations of mathematical physics.

The solution of the problem is carried out in accordance with the basic techniques outlined in [12–14, 18], in the following order.

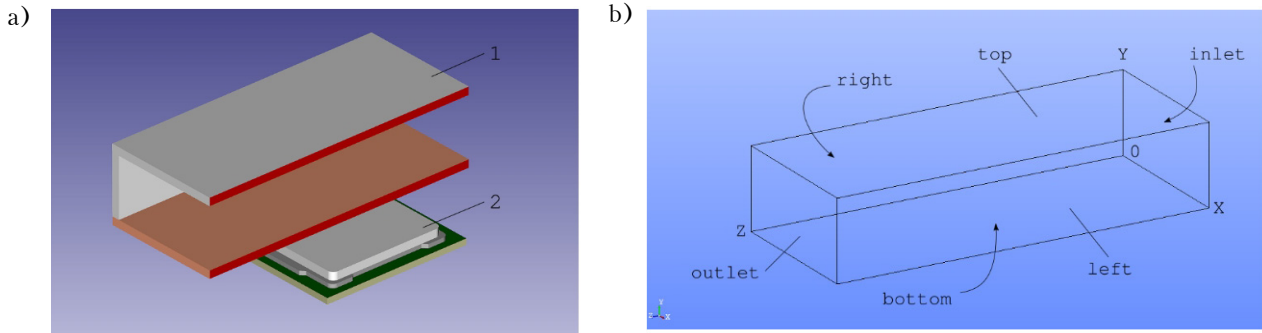


Fig. 1. Model of the microprocessor with the cooler (a) and the flow volume of the cooler (b):

1 – symmetrical half of the cooler; 2 – microprocessor

1. Create a project directory

1.1. Create a project directory with a name, for example, *rect_cooler* (rectangular cooler) in the system directory *Home* of the CAELinux operating system.

1.2. Place directories and files of icoFoam solver to the project directory *rect_cooler*. To do this, go to the system directory of the CAELinux operating system */opt/openfoam211/tutorials/incompressible/icoFoam/cavity* and copy directories named *0*, *constant* and *system* to the directory *rect_cooler* (Fig. 2).

1.3. Go to the directory *constant* and empty the *polyMesh* directory. To do this, delete the *blockMeshDict* and *boundary* files in the *polyMesh* directory.

2. Create a geometric model of the cooler flow volume in SALOME

2.1. Run SALOME and go to geometric module Geometry.

2.2. Using the Box graphic primitive to create a geometric model of the flow volume in accordance with the specified dimensions in the form of its symmetrical half with a width of $X/2 = 30$ mm, and assign it a name, for example, coinciding with the name of the *rect_cooler* project directory.

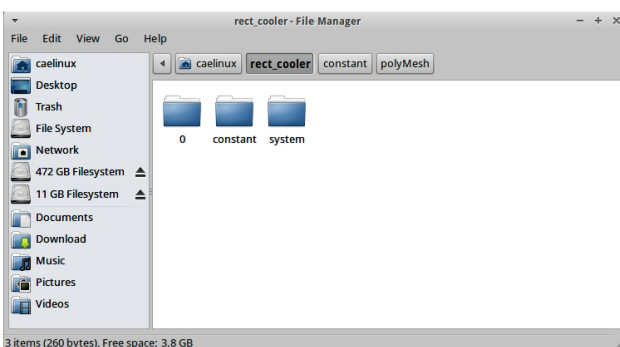


Fig. 2. The contents of the project directory *rect_cooler* before solving the problem

2.3. For the *rect_cooler* geometric model, use the Create Group operation to select the surfaces (see Fig. 1, b) that correspond to the specified boundary conditions of the problem:

- the water inlet into the flow volume occurs through the surface inlet, perpendicular to the *Z* axis and coinciding with the *Y0X* plane;
- the water outlet from the flow volume occurs through the surface outlet, perpendicular to the *Z* axis and spaced from the *Y0X* plane at a distance equal to the length of the flow volume;
- the *top* and *bottom* surfaces of the flow volume, perpendicular to the *Y* axis, as well as the *right* surface, perpendicular to the *X* axis and coinciding with the plane *Y0Z*, are solid impermeable walls;
- the *left* surface of the flow volume, perpendicular to the *X* axis and spaced from the plane *Y0Z* at a distance equal to the width of the model, is the plane of symmetry.

2.4. Save the result of creating a geometric model of the flow volume of the cooler to the *rect_cooler_geometry.hdf* file in the *rect_cooler* project directory, making sure that the Object Browser window of the SALOME desktop contains all the surfaces created as part of the *rect_cooler* model (Fig. 3, a).

3. Mesh the geometric model of the flow volume of the cooler in SALOME

3.1. Without quitting SALOME, go to the Mesh meshing module.

3.2. Since the geometrical model of the flow volume of the cooler has the form of a parallelepiped, use Hexahedron finite elements in the form of hexahedrons. Using the Create Mesh operation, set the following meshing parameters:

- Wire Discretization algorithm for dividing the edges of the model, Automatic Length hypothesis of dividing the edges of the model with the quality value, e.g., 0.5;

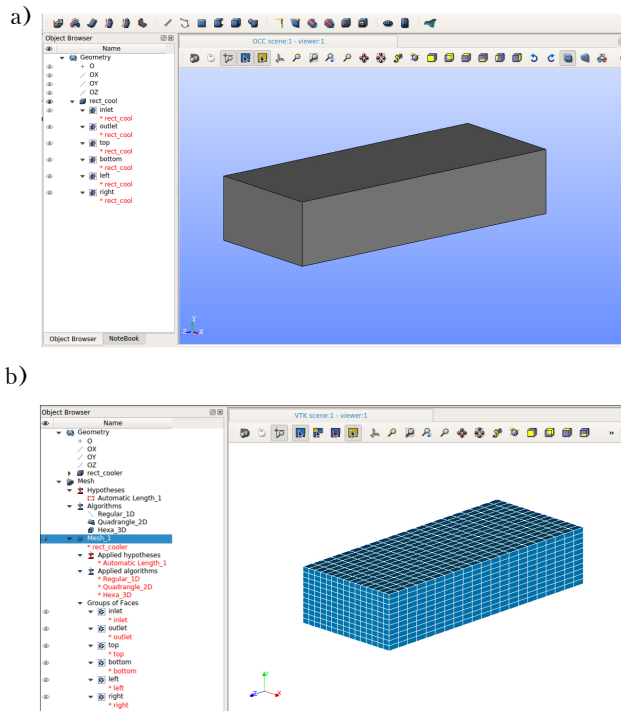


Fig. 3. The geometric model of the flow volume of the cooler (a) and the result of its meshing (b)

- Quadrangle (Mapping) algorithm for model surface partitioning;
- Hexahedron (i, j, k) algorithm for partitioning the volume of the model.

3.3. With the help of the Compute operation, perform a meshing of the model and its surfaces that correspond to the boundary conditions of the problem (see 2.3). The result of meshing the *rect_cooler* geometric model of the cooler flow volume is shown in Fig. 3, b. For meshing parameters given in 3.2 the model contains 3465 finite elements.

4. Conversion of the flow volume model of the cooler into the OpenFOAM format

4.1. While in the meshing module Mesh, export the cooler model to the I-DEAS (integrated design and engineering analysis software) intermediate .unv format. To do this, select the Mesh_1 object in the Object Browser window (see Fig. 3, b) and select File → Export → UNV file in the main menu of the SALOME desktop.

4.2. Save the result in the *rect_cooler* project directory in the file with a name, for example, *Mesh_1.unv*. Minimize the window or exit the SALOME geometric modeling system (optional).

4.3. Open the OpenFOAM terminal window by selecting Applications → caelinux → OpenFOAM 2.2.1 terminal in the main menu of the CAELinux

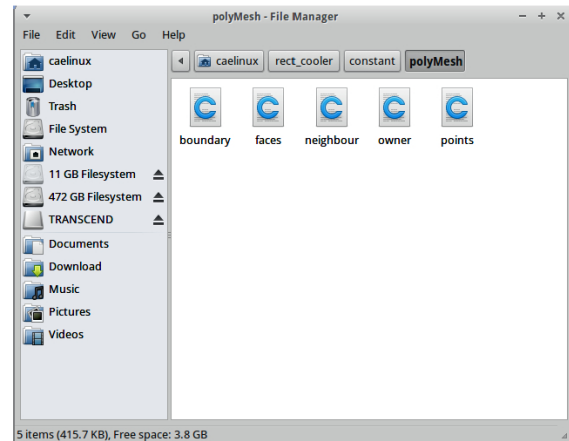


Fig. 4. The contents of the subdirectory *rect_cooler/constant/polyMesh* after converting the cooler model from SALOME to OpenFOAM

operating system desktop, and enter the *rect_cooler* project directory.

4.4. Convert the cooler model from the intermediate I-DEAS format to the OpenFOAM format by executing the *ideasUnvToFoam Mesh_1.unv* command in the terminal window. Make sure that the protocol for executing the *ideasUnvToFoam* command was completed with the End string, indicating that the conversion was successful without errors. Also, make sure that the result of the conversion was the creation of *boundary*, *faces*, *neighbor*, *owner* and *points* files in the *rect_cooler/constant/polyMesh* project subdirectory (Fig. 4).

4.5. Convert the dimensions of the cooler model specified in the SALOME geometric modeling system in millimeters to meters, accepted in the OpenFOAM mathematical modeling system by default. To do this, execute the *transformPoints -scale '(0.001 0.001 0.001)'* command in the terminal window and make sure that there are no errors.

5. Prepare the flow volume model of the cooler to the computation by OpenFOAM

5.1. Define the types of surfaces of the cooler model that correspond to the boundary conditions of the problem (see 2.3). To do this, open the *rect_cooler/constant/polyMesh/boundary* file in any text editor and make the following changes:

- for the *inlet* and *outlet* surfaces, specify the *patch* type;
- for the *top*, *bottom* and *right* surfaces, specify the *wall* type;
- for the *left* surface, specify the *symmetryPlane* type.

The *rect_cooler/constant/polyMesh/boundary* file should have the following form (the order

of the surfaces and the value of the `startFace` parameter can be different):

```
6
(
  left
  {
    type      symmetryPlane;
    nFaces    231;
    startFace 9684;
  }
  right
  {
    type      wall;
    nFaces    231;
    startFace 9915;
  }
  inlet
  {
    type      patch;
    nFaces    165;
    startFace 10146;
  }
  outlet
  {
    type      patch;
    nFaces    165;
    startFace 10311;
  }
  top
  {
    type      wall;
    nFaces    315;
    startFace 10476;
  }
  bottom
  {
    type      wall;
    nFaces    315;
    startFace 10791;
  }
)
```

5.2. Set the initial and boundary values of the water velocity, corresponding to the initial data and the boundary conditions of the problem (see 2.3). To do this, open the *rect_cooler/0/U* file in any text editor and make the following changes:

- on the *inlet* surface, set the velocity value at the inlet to the flow volume of the model: 0.01 m/s along the *Z* axis, and 0 m/s along the remaining axes;
- define the *outlet* surface as a surface with zero gradient;
- on the *top*, *bottom* and *right* surfaces, set zero velocity value in all coordinate axes;
- define the *left* surface as a plane of symmetry.

The *rect_cooler/0/U* file should have the following form (the order of the surfaces may be different):

```
dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];
internalField    uniform (0 0 0);
boundaryField
{
  inlet
```

```
{
  type      fixedValue;
  value      uniform (0 0 0.01);
}
left
{
  type      symmetryPlane;
}
right
{
  type      fixedValue;
  value      uniform (0 0 0);
}
outlet
{
  type      zeroGradient;
}
top
{
  type      fixedValue;
  value      uniform (0 0 0);
}
bottom
{
  type      fixedValue;
  value      uniform (0 0 0);
}
}
```

5.3. Set the initial and boundary values of the water pressure, corresponding to the boundary conditions of the problem (see 2.3). To do this, open the *rect_cooler/0/p* file in any text editor and make the following changes:

- set the *inlet*, *top*, *bottom* and *right* surfaces as surfaces with zero gradient;
- set zero pressure value on the *outlet* surface;
- define the *left* surface as a plane of symmetry.

The *rect_cooler/0/p* file should have the following form (the order of the surfaces may be different):

```
dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];
internalField    uniform 0;
boundaryField
{
  inlet
  {
    type      zeroGradient;
  }
  outlet
  {
    type      fixedValue;
    value      uniform 0;
  }
  left
  {
    type      symmetryPlane;
  }
  right
  {
    type      zeroGradient;
  }
  top
  {
    type      zeroGradient;
  }
  bottom
  {
    type      zeroGradient;
  }
}
```

5.4. Set the physical properties of the water according to the conditions of the problem. When using the `icoFoam` solver, it is sufficient to specify only the kinematic viscosity value ν . At a temperature of 20°C, $\nu = 0.000001 \text{ m}^2/\text{s}$. In any text editor open the `rect_cooler/constant/transportProperties` file and enter the value of this parameter. The file should contain:

```
nu      nu [0 2 -1 0 0 0 0] 0.000001;
```

5.5. Set computation parameters. To do this, open the `rect_cooler/system/controlDict` file in any text editor and make the following entries:

- set the start time of the computation (*startTime*) to zero;

- the end time of the computation (*endTime*) is equal to the time when the steady flow of water in the cooler sets in. To quantify it, an empirical rule is used, according to which for a given flow velocity at the inlet, the flow volume must be updated 10 times, i.e. with an inlet flow velocity of 0.01 m/s and a cooler length in the direction of flow of 0.07 m the time of setting the steady state is 70 s;

- the Δt time step of the computation is accepted so that during the computation the maximum value of the Courant Number (*Courant Number max*) displayed in the OpenFOAM terminal window for the count protocol does not exceed 1.0. For the initial data received, the value of Δt should be taken as 0.1 s;

- interval of recording the intermediate results of the *writeInterval* computation should be set. For example, if the computation time is 70 s, the time step is 0.1 s, the interval of recording intermediate results is 20, then 35 subdirectories containing velocity and pressure values for the cooler model for every 2 seconds will be created in the project's directory.

The rest of the parameters remain unchanged [13].

The `rect_cooler/system/controlDict` file should look like this:

```
application      icoFoam;
startFrom        startTime;
startTime        0;
stopAt           endTime;
endTime          70;
deltaT           0.1;
writeControl      timeStep;
writeInterval     20;
purgeWrite        0;
writeFormat       ascii;
writePrecision    6;
writeCompression off;
timeFormat        general;
timePrecision     6;
runTimeModifiable true;
```

6. Running the task and obtaining a solution

6.1. Run the task for computation. To do this, execute the `icoFoam` command in the OpenFOAM terminal window while in the project's directory.

6.2. Observe the computation process watching the count protocol which is dynamically displayed in real time during the solution of the problem in the terminal window. The final part of the count protocol is shown in **Fig. 5**. The protocol contains the current time (*Time*) from the moment of the beginning of the water flow with the time step Δt , the average (*Courant Number mean*) and the maximum (*Courant Number max*) values of the Courant number, initial (*Initial residual*) and final (*Final residual*) values of the calculation of the remaining projections of velocity U and pressure p for the corresponding current time *Time*, the time of task solving (CPU time) *ClockTime* and other parameters.

6.3. Wait for the successful completion of the task, when the output of the count protocol data stops in the terminal window at the *endTime* moment, and the last line of the count protocol contains the *End* value. The content of the `rect_cooler` project directory for completed computation is shown in **Fig. 6**. Depending on the processor performance and the size of the computer's main memory, the time for solving the problem can vary from 4 to 15 seconds or more.

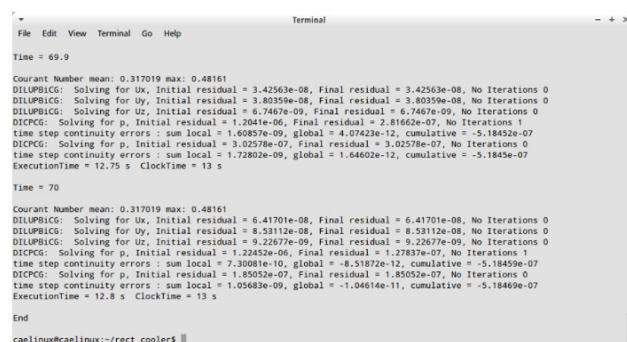


Fig. 5. The final part of the count protocol

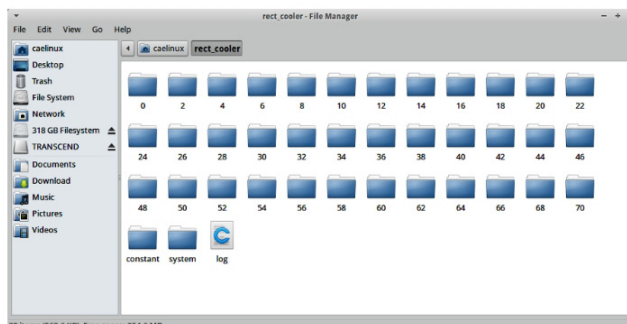


Fig. 6. The contents of the `rect_cooler` project directory after the computation is completed

6.4. Make sure that 35 subdirectories are created in the *rect_cooler* project directory, the names of which correspond to the given time intervals of the flow in 2-second increments, containing the required values of the velocity U and the pressure p at the nodes of the meshed model of the flow volume of the cooler (see Fig. 6).

7. Analysing the results of solving the problem in ParaView

7.1. Download the results of the solution of the problem, i.e. the contents of the *rect_cooler/2 ... rect_cooler/70* subdirectories to the ParaView parallel computing visualizer. To do this, run the *paraFoam* command in the OpenFOAM terminal window. As a result of the command, the main window of the ParaView will open on the desktop of the CAELinux operating system, and an empty file named *rect_cooler/rect_cooler.OpenFOAM* will be created in the project's directory, through which the visualizer will access the data of subdirectories of the *rect_cooler* project directory.

7.2. Display the image of the geometric model of the cooler on the desktop of the visualizer and visualize the pressure distribution p in it (Fig. 7).

The pressure values obtained as a result of the solving the problem are the specific values related to the density of the cooling liquid and have the dimension m^2/s^2 . At a temperature of 20°C, the

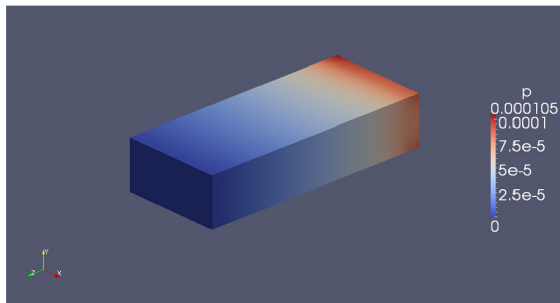


Fig. 7. Pressure distribution p in the flow volume of the cooler

density of water is 998.2 kg/m³. Thus, in order to ensure a given velocity at the inlet to the cooler, the water pressure drop must be $\Delta p = 998.2 \cdot 0.000105 = 0.1$ Pa.

Example 2

Cooler design with hose connections

In the design of the cooler, two cylindrical hose connections are added to connect the chiller with a diameter of 9 mm and a length of 13 mm (Fig. 8, a).

The water flow rate through the cooler is assumed to be the same as in Example 1, in order to be able to compare the results, so that its inlet velocity is set to $U = 0.141$ m/s. The solution of the problem was carried out according to the method described in the previous example, with the following features:

- the flow volume of the cooler has a complex shape, its geometric model (Fig. 8, b) is created in SALOME using the *Fuse* logical operation of combining of the Box graphic primitive and two Cylinder graphic primitives;

- the model has 10 boundary surfaces: inlet, outlet, symmetry plane and seven solid impermeable walls (see Fig. 8, b);

- *Tetrahedron* finite elements in the form of tetrahedrons (pyramids) were used for meshing, with the value of the edge partitioning quality of the model 0.6 (Fig. 9), the number of finite elements was 63715.

The result of the solution of the problem, which is a visualization of the pressure distribution in the flow volume of the cooler, is shown in Fig. 10. It can be seen that in order to ensure a predetermined water flow rate through the cooler, the pressure drop should be equal to $\Delta p = 998.2 \cdot 0.0129 = 12.9$ Pa. Comparing this value with the result obtained in Example 1, one can see that as the flow velocity at the inlet to the cooler increases by an order of magnitude, the pressure drop increases by two orders of magnitude, which corresponds to the

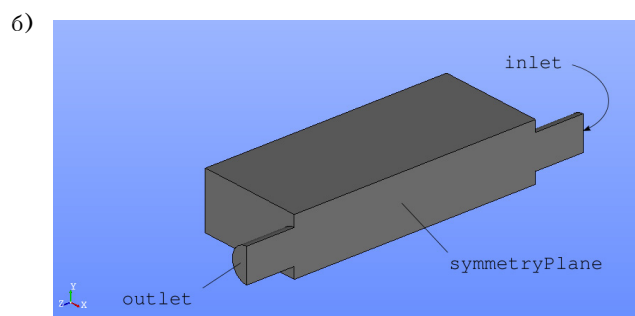
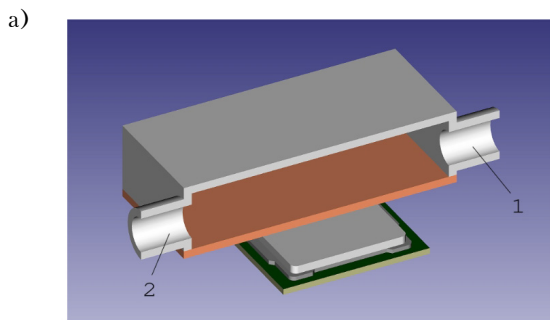


Fig. 8. Model of a microprocessor with a symmetrical half of the cooler with hose connections (a) and the flow volume of the cooler (b)

1 — inlet hose connection; 2 — outlet hose connection

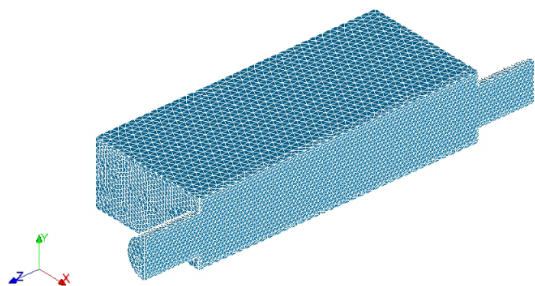


Fig. 9. The result of meshing the geometric model of the flow volume of the cooler with hose connections

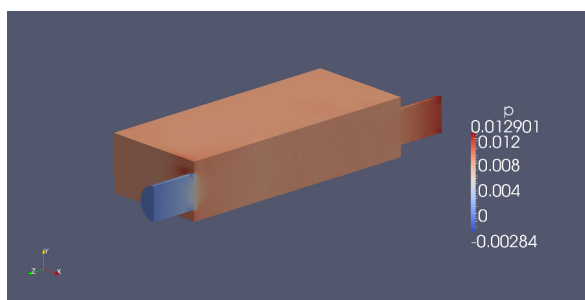


Fig. 10. Pressure distribution p in the flow volume of the cooler

quadratic character of the hydrodynamic characteristic described by equation (1). This result is one of the reasons for trusting the software used and the method proposed.

Conclusions

Considered on simple examples, the CAD/CAE method for solving the hydrodynamic problem using free software SALOME, OpenFOAM and ParaView on a platform of the CAELinux operating system was successfully used by authors when designing more complex coolers — not only symmetrical but also containing dozens and hundreds of planar and curvilinear boundary surfaces, with a sudden change in the direction of flow and velocity of cooling liquid, when the value of CPU time for obtaining a solution for only one variant of the initial data were tens of hours.

Due to the limited size of the journal article, many important issues were not considered here, such as the adequacy of the geometric model to the real design, the choice of algorithms and meshing hypotheses, their effect on the solution result, the use of a simpleFoam solver that takes into account the turbulence of the coolant flow, ensuring convergence of solution, parallelization of the task to reduce the time of computing, presentation of the solution results not only with visualization pictures, the adequacy of the solution to the experimental data. The authors plan to devote their future publications to these issues.

REFERENCES

1. Berd R., St'yuart V., Laitfut E. *Yavleniya Perenosy* [Transport Phenomena]. Moscow, Khimiya, 1974, 688 p. (Rus)
2. Spokoyny Yu. E., Trofimov V. E., Gidalevich V. B. *Teplomassoobmen v REA* [Heat and Mass Transfer in REA: Collection of tasks. Kiev, Odessa, Lybid, 1991, 224 p. (Rus)
3. Idel'chik I. E. *Aerogidrodinamika tekhnologicheskikh apparatov (Podvod, otvod i raspredelenie potoka po secheniyu apparatov)* [Aerohydrodynamics of Technological Apparatuses (Approach, Diversion and Distribution of Flow Along the Cross-Section of Apparatuses)]. Moscow, Mashinostroenie, 1983, 351 p. (Rus)
4. Reznikov G. V. *Raschet i Konstruirovaniye Sistem Okhlazhdeniya EVM* [Calculation and Design of Cooling Systems EVM]. Moscow, Radio i Svyaz', 1988, 224 p. (Rus)
5. 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, 2006, pp. 1-21.
6. Spokoyny M., Trofimov V. Collider jets cooling method of microprocessors. *Proc. of the International Microelectronics and Packaging Society ATW on Thermal Management, Session 12 "Liquid, phase-change and refrigeration cooling"*, 2011, Palo Alto, CA, USA, pp. 1-18.
7. Spokoyny M. Yu., Trofimov V. E., Shevchuk M. V. CFD modeling of heat transfer in a rectangular channel with dimplepin finning. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2013, no. 2-3, pp. 33-38. (Rus)
8. Trofimov V. E., Pavlov A. L. Animation of contrary jets interaction in the radiator for microprocessor liquid cooling. *Proc. of the 15th International Scientific-Practical Conference "Modern Information and Electronic Technologies"*, Ukraine, Odessa, 2014, pp. 26-27. (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 16th International Scientific-Practical Conference "Modern Information and Electronic Technologies"*, Ukraine, Odessa, 2015, pp. 160-161. (Rus)
10. Trofimov V. E., Pavlov A. L. Intensification of heat transfer in liquid heat exchangers with dimple-pin finning. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2016, no. 1, pp. 23-26. (Rus) <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2016.1.23>
11. Shehovtsova V. I. [The problem of choice and criteria for evaluating the automated design]. *Visnik NTU "KHPI"*, 2014, no. 26 (1069), pp. 101-108. (Rus)
12. SALOME. *The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation* [Electronic resource]. <http://www.salome-platform.org> (Date of the application 04.04.2018.)
13. OpenFOAM. *The open source CFD toolbox* [Electronic resource]. <http://www.openfoam.com> (Date of the application 04.04.2018).
14. ParaView. *The open source multi-platform data analysis and visualization application* [Electronic resource]. <http://www.paraview.org> (Date of the application 04.04.2018).
15. Lazarev T.V. Simulation of thermoelectric state by means of OpenFOAM. *Proceedings of the NTUU "Igor Sikorsky KPI". Series: Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving*, 2013, no. 1, pp. 26-30. (Rus)
16. M. de Groot. *Flow prediction in brain aneurysms using OpenFOAM*, 2014 [Electronic resource]. https://www.utwente.nl/en/eemcs/sacs/teaching/Thesis/masterthesis_meindert_de_groot.pdf (Date of the application 06.04.2018.)
17. Juan Marcelo Gimenez, Axel Larreteguy, Santiago Márquez Damián, Norberto Nigro. *Short course on OpenFOAM*

development. ENIEF 2014, Instituto Balseiro, Bariloche, Argentina, [Electronic resource]. https://cimec.org.ar/foswiki/pub/Main/Cimec/CursoCFD/OF_Developers_Course.pdf (Date of the application 06.04.2018.)

18. CAELinux. Open-source powered engineering [Electronic resource]. <http://caelinux.com> (date of the application 04.04.2018.)

Received 02.04.2018

DOI: 10.15222/TKEA2018.2.33
УДК 536.24

К. т. н. В. Є. ТРОФІМОВ, к. т. н. А. Л. ПАВЛОВ,
Я. Г. МАМИКІН

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

CAD/CAE-МЕТОД ВИРІШЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ ЗАДАЧІ ПРИ РОЗРОБЦІ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ

Необхідність вирішення гідродинамічної задачі виникає в тому випадку, коли для забезпечення теплового режиму електронного приладу необхідним є застосування примусового рідинного охолодження, реалізованого у вигляді охолоджувачів тієї чи іншої конструкції. Результатом її рішення є вибір насоса, здатного подолати гідродинамічний опір охолоджувача при заданих значеннях витрати рідини. Вибрати насос не важко, коли відома гідродинамічна характеристика охолоджувача — залежність надлишкового тиску рідини на вході від швидкості рідини, яка протікає через охолоджувач. Тенденція до ускладнення конструкцій охолоджувачів з нетрадиційними течіями виключає використання відомих аналітичних залежностей і вимагає застосування інших методів, наприклад математичного моделювання. Його основні етапи: розробка 3D геометричної моделі охолоджувача; визначення в її межах швидкості і тиску рідини шляхом вирішення системи диференціальних рівнянь нерозривності і Нав'є — Стокса; представлення результатів рішення в вигляді, зручному для аналізу.

Для реалізації такого підходу потрібне спеціалізоване програмне забезпечення (ПЗ) типу CAD/CAE. Дорожняча пропрієтарних CAD/CAE-систем разом з вимогою використання при проектуванні виключно легального ПЗ викликали необхідність вирішення зазначеної задачі за допомогою вільних програмних продуктів, наприклад системи геометричного моделювання SALOME, системи математичного моделювання OpenFOAM і візуалізатора паралельних обчислень ParaView.

Серед основних перешкод застосування зазначеного ПЗ — його слабка документованість. Мета даної роботи — показати на практичних прикладах, заснованих на досвіді проектування рідинних охолоджувачів для мікропроцесорів, недокументовані особливості використання SALOME, OpenFOAM і ParaView на платформі операційної системи CAELinux. У роботі на двох прикладах докладно розглянуто методику рішення задачі, що дозволяє успішно застосовувати даний підхід при проектуванні складних реальних конструкцій охолоджувачів електронних приладів.

Ключові слова: рідинне охолодження електронних приладів, CAD/CAE-моделювання, CAELinux, SALOME, OpenFOAM, ParaView.

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

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

CAD/CAE-МЕТОД РЕШЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Приведены примеры решения гидродинамической задачи, которая возникает при разработке мощных электронных приборов, требующих жидкостного охлаждения, методом CAD/CAE-моделирования. Рассмотрены не документированные или слабо документированные особенности ее решения на основе использования свободного программного обеспечения SALOME, OpenFOAM и ParaView на платформе операционной системы CAELinux.

Ключевые слова: жидкостное охлаждение электронных приборов, CAD/CAE-моделирование, CAELinux, SALOME, OpenFOAM, ParaView.

Cite the article as:

Trofimov V. E., Pavlov A. L., Mamykin Y. G. CAD/CAE method of solving the hydrodynamic problem while developing powerful electronic devices. Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature, 2018, no. 2, pp. 33-41. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.33>

К. т. н. А. Н. ТЫНЫНЬКА

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: polalek562@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ЗАПАСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ЧАСТОТЕ ОТКАЗОВ

Предложена модель для прогнозирования количества запасных частей на основе анализа параметров надежности и частоты отказов электрорадиоизделий технических систем при использовании распределения Рэлея, позволяющая определять необходимое количество запасных частей к моменту ожидаемого отказа или когда надежность системы падает ниже заданного уровня. С ее помощью можно проводить расчеты одиночных комплектов запасных частей, предназначенных для восстановления работоспособности технических систем.

Ключевые слова: надежность, запасные части, метод прогнозирования, распределение Рэлея, уровень отказов.

Сложные технические системы, используемые в различных сферах деятельности, состоят, как правило, из большого количества компонентов и деталей, и по мере усложнения структуры и функций систем все большее значение приобретает обеспечение их надежной и эффективной работы.

Анализ проблем в области формирования ЗИП

Одним из способов повышения уровня надежности является создание комплектов запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП) для оперативной замены в отказавшей системе. Важным показателем для потребителя является коэффициент готовности системы, зависящий от возможности быстрой замены отказавшего компонента или узла. Для того чтобы в такой системе на должном уровне поддерживалась работоспособность, требуется эффективное управление этими запасами [1], поэтому комплектование систем запасным имуществом справедливо рассматривается как частная задача теории управления запасами [2]. Ее решение имеет важное значение для обеспечения непрерывности эксплуатации, а в ряде случаев и для достижения требуемой безопасности. При этом большую роль играет непредсказуемость наступления отказа оборудования и деталей. Одним из способов минимизации ее негативных последствий является поддержание такого количества запасных частей, которое бы заведомо гарантировало замену в случае отказа, однако очевидно, что при реализации такого подхода стоимость складских запасов будет неоправданно завышена.

Более экономным способом является определение необходимого количества запасных частей с использованием одной из доступных мо-

делей прогнозирования [3]. Поскольку из-за упомянутой непредсказуемости спрос на запасные части имеет стохастический характер, применение моделей, устанавливающих неизменный объем ЗИП на весь жизненный цикл изделия только в зависимости от количества находящейся в эксплуатации техники, не всегда позволяет получить адекватную оценку [4]. По этой причине более предпочтительны модели, основанные на использовании таких параметров, как надежность запасных частей, сложность и качество обслуживания, продолжительность жизни, интенсивность эксплуатации, расходы на техническое обслуживание и т. д.

Таким образом, важнейшая из проблем этой области — оптимизация уровня запасов. Основным показателем для восстанавливаемых изделий служит ожидаемое количество возможных недостатков компонентов в условиях ограниченного финансирования, также часто минимизируется ожидаемое время простоя.

В этом вопросе особняком стоит задача расчета ЗИП к проектируемой технике, когда низкая точность исходных данных, априори неизвестная интенсивность отказов и восстановлений оправдывают применение простейших методов расчета. Эта точность может быть настолько низкой, что потребуются учет дополнительных затрат на перепроектирование.

Вопросы расчета надежности оборудования с учетом ЗИП и определение его оптимального состава не теряют своей актуальности и постоянно рассматриваются специалистами. Помимо всего прочего, это связано с тем, что большая доля техники, находящейся в эксплуатации, имеет значительную и постоянно возрастающую нагрузку, нередко превышающую паспортный срок

службы. В таком оборудовании идут ускоренные деградиционные процессы, поэтому остается актуальной задача расчета надежности оборудования, оснащенного ЗИП, с учетом старения.

Среди авторов, уделявших внимание вопросам снабжения ЗИП и минимизации затрат, можно выделить Ю. И. Рыжикова, одного из тех, кто разрабатывал теорию запасов [2]. Было немало работ и других представителей теории надежности, например [5].

Ключевым при выборе подхода и метода оптимизации величины запаса является вопрос критериев оптимизации. Они могут быть экономическими (например, минимизация затрат или максимизация прибыли, что должно приводить к тождественным результатам) или надежностными [5–7] (тут можно сформулировать несколько критериев оптимизации), могут комбинироваться методы управления запасами, теории очередей и эффективности технических систем [8]. Но все-таки ЗИП создается для обеспечения надежности, поддержания работоспособности, повышения готовности, поэтому критерии надежности при формировании ЗИП должны быть основными.

В [9] дана модель задачи оптимизации комплекта запасных изделий и приборов с учетом старения элементов. В рассмотренном виде задача определения состава ЗИП относится к категории задач нелинейного программирования и может быть решена только численными методами. Столь же сложно решается задача на основе динамического программирования [10], в то время как существует потребность в менее трудоемких методах. Такой метод можно получить, основываясь на использовании подходящей модели моментов отказов, что и сделано в настоящей работе.

Из-за сложности обслуживаемых изделий и систем надежность обычно рассматривается как количественная мера. Анализируя надежность и частоту отказов системы, можно оценить необходимое количество запасных частей в момент ожидаемого отказа или падения надежности ниже заданного уровня.

В настоящей работе предложена достаточно простая модель для оценки количества запасных частей на основе анализа параметров надежности.

Прогнозирование количества запасных частей с использованием распределения Рэлея

Производители запасных частей предоставляют только основную информацию о своей продукции. Можно считать известным средний срок службы запасной части (компонента) T_{cp} , выраженный в часах. Замена компонента в соответствии с потребностью — это стохастический процесс [11]. Важнейшей априорной информацией является теоретическая модель моментов отказа, поскольку в итоге она определяет объем запасных частей.

Поскольку считается, что распределение Рэлея хорошо описывает постепенные отказы из-за старения компонентов, принимаем, что распределение наработки на отказ составных компонентов технической системы подчиняется закону Рэлея. Кроме этого, принимаем также следующие допущения [12]: восстанавливаемая аппаратура состоит из последовательно соединенных с точки зрения надежности невосстанавливаемых элементов; надежность всех элементов одинакова; отказы всех элементов происходят независимо друг от друга.

Плотность вероятности распределения (ПВР) моментов отказов в модели Рэлея устанавливается уравнением

$$f(t) = (t/\sigma^2) \cdot \exp[-0,5(t/\sigma)^2],$$

где σ — параметр распределения Рэлея, определяемый соотношением $M(t^2) = 2\sigma^2$; $M(t)$ — математическое ожидание случайной величины t , распределенной по закону Рэлея.

Исходя из этого, T_{cp} может быть представлено следующим образом:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} (t/\sigma)^2 \exp[-0,5(t/\sigma)^2] dt.$$

Преобразуем это уравнение, произведя замену $t^2/(2\sigma^2) = v$:

$$T_{cp} = \sigma\sqrt{2} \int_0^{\infty} v^{0,5} \exp(-v) dv = \sigma\sqrt{2} \cdot \Gamma(3/2).$$

Гамма-функция (интеграл Эйлера второго рода) $\Gamma(3/2) = \sqrt{\pi}/2$, поэтому средняя продолжительность работоспособности компонента составляет $T_{cp} = \sigma\sqrt{\pi/2}$.

Исходя из вышеизложенного, ПВР в модели Рэлея можно представить в виде

$$f(t) = \frac{\pi t}{2T_{cp}^2} \exp\left(-\frac{\pi t^2}{4T_{cp}^2}\right).$$

Интегральный закон распределения определим аналогичным образом:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = \int_0^t f(\pi/2T_{cp}^2) \exp(-\pi t^2/(4T_{cp}^2)) dt.$$

Если подставить $\pi t^2/(4T_{cp}^2) = v$ в это выражение, его можно свести к уравнению вида

$$F(t) = \int_0^v \exp(-v) dv = 1 - \exp(-v).$$

Функция надежности технической системы $R(t) = 1 - F(t) = \exp(-v)$.

Наконец, на основе предыдущих уравнений мы можем определить функцию отказа как вероятность того, что исследуемые компоненты откажут за определенный промежуток времени:

$$\gamma = f(t)/R(t) = \pi t/2T_{cp}^2.$$

Суть этой модели в том, что $T_{\text{ср}}$ считается переменной величиной, подчеркивая стохастический характер процесса. Наблюдая вариации этой случайной величины во временном интервале в окрестности $dT_{\text{ср}}$, мы можем определить количество ненадежных компонентов следующим образом:

$$n = \int_0^{\infty} f(t|T_{\text{ср}}) f(T_{\text{ср}}) dT_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} f(t) T_{\text{ср}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{T_{\text{ср}}^2}{2\sigma^2}\right) dT_{\text{ср}}.$$

где $T_{\text{ср}}$ — случайная величина, распределенная по закону Гаусса с дисперсией $D(T_{\text{ср}}) = \sigma^2$.

Заменой $T_{\text{ср}}^2/(2\sigma^2) = v_1$ предыдущее уравнение сводится к

$$n = f(t) \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp(-v_1) dv = f(t) \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}}.$$

Учитывая, что t — случайная величина Рэлея с математическим ожиданием $M(t) = T_{\text{ср}}$ и дисперсией $D(t) = 2T_{\text{ср}}/\pi$, среднее число компонентов n , в которых появятся дефекты за время $T_{\text{ср}}$, можно определить как

$$n = T_{\text{ср}} f(t) \sqrt{2} = \frac{\pi t}{T_{\text{ср}} \sqrt{2}} \exp\left(-\frac{\pi t^2}{4T_{\text{ср}}^2}\right).$$

Кроме того, количество запасных частей, необходимых в инвентаре, может быть определено путем наблюдения за общим временем, когда случайная величина t ниже $T_{\text{ср}}$:

$$w = \frac{F(t)}{n} = \frac{1 - \exp\left[-\pi t^2/(4T_{\text{ср}}^2)\right]}{t\pi/(T_{\text{ср}}\sqrt{2}) \cdot \exp\left[-\pi t^2/(4T_{\text{ср}}^2)\right]}.$$

Заключение

Использование теоретической плотности вероятности распределения моментов отказов компонентов технической системы является сравнительно простым способом прогнозирования необходимого количества ЗИП. Когда компоненты подвержены постепенным отказам и известен

средний срок службы запасных частей, можно использовать для расчета ПВР в модели Рэлея. Прогнозирование на ее основе выполняет основную свою функцию — предотвращает задержки при техническом обслуживании и минимизирует перегрузку запасными частями. Зная количество запасных частей, которые необходимо хранить в инвентаре, можно далее определить стоимость замены единицы недостающих компонентов.

Модель может служить удобной основой при создании программного обеспечения для прогнозирования количества запасных частей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Gopalakrishnan P., Banerji A. K. Maintenance and Spare Parts. — India: PHI Learning Pvt. Ltd, 2003.
2. Рыжиков Ю. И. Теория очередей и управление запасами. — СПб.: Питер, 2001.
3. Ben-Daya M, Duffuaa S. O., Raouf A. Maintenance, Modeling and Optimization. — New York: Springer Science&Business Media, 2012.
4. Manzini R, Regattieri A, Pham H, Ferrari E. Maintenance for Industrial System. — New York: Springer Science&Media, 2009.
5. Черкесов Г. Н. Проблема ЗИП и задача формирования нового раздела теории надежности восстанавливаемых систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ, Сер. «Информатика. Телекоммуникации, Управление». — 2011. — №6 (138). — С. 136—153.
6. Черкесов Г. Н. Оценка надежности систем с учетом ЗИП. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012.
7. Черкесов Г. Н. О проблеме расчета надежности восстанавливаемых систем при наличии запасных элементов. Ч. 1 // Надежность. — 2010. — №3. — С. 29—39.
8. Рыжиков Ю. И. Планирование восстанавливаемого ЗИПа // Интегрированная логистика. — 2011. — №1. — С. 34—36.
9. Антонов А. В., Пляскин А. В., Татаев Х. Н. К вопросу оптимизации комплекта запасных изделий с учетом частичной выработки их ресурса // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — №1.
10. Лысенко И. В., Птушкин А. И., Соколов Б. В. Методика синтеза комплекта ЗИП на основе динамического программирования // Изв. Вузов. Приборостроение. — 2013. — Т. 56, №3. — С. 16-21.
11. Wang H., Pham H. Reliability and optimal maintenance. Springer series in reliability engineering. — London: Springer, 2006. — P. 295. — <http://dx.doi.org/10.1007/b138077>
12. Кульбак Л. И. Основы расчета обеспечения электронной аппаратуры запасными элементами. — Москва: Сов. Радио, 1970.

Дата поступления рукописи
в редакцию 14.03 2018 г.

О. М. ТИНИНИКА

Україна, Одеський національний політехнічний університет
E-mail: polalek562@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ЗАПАСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ЗА ЧАСТОТОЮ ВІДМОВ

Одним із способів підвищення рівня надійності технічних систем є створення комплекту запасних частин, агрегатів, виробів для їх оперативної заміни за виникнення відмов. Для забезпечення функціонування системи на належному рівні необхідне ефективне управління цими резервами, тому придбання запасних частин правомірно розглядається як особлива проблема теорії управління запасами, вирішення якої важливе для забезпечення безперервності експлуатації, а в ряді випадків і для досягнення необхідної безпеки. Непередбачуваність відмови обладнання та деталей має тут велике значення. Одним із способів зменшення рівня непредбачуваності є зберігання достатньої кількості запасних частин, що призводить

до збільшення вартості запасів. Більш дешевий спосіб — оцінити необхідний комплект запчастин за допомогою однієї з доступних моделей прогнозування, при цьому перевагу мають ті моделі, що стосуються оцінки необхідної кількості запасних частин на основі таких параметрів, як їх надійність, складність і якість сервісу, тривалість життя, інтенсивність експлуатації, витрати на обслуговування та інше. У даній роботі запропоновано досить просту модель для оцінки кількості запасних частин на основі аналізу параметрів надійності з використанням розподілу Релея. Прогнозування на її основі виконує свою основну функцію — запобігає затримці при технічному обслуговуванні і мінімізує перевантаження запасними частинами. За допомогою одержаної формули можуть проводитися розрахунки поодиноких комплектів запасних частин, призначених для ремонту, профілактичних робіт і налаштування.

Ключові слова: надійність, запасні частини, метод прогнозування, розподіл Релея, рівень відмов.

DOI: 10.15222/TKEA2018.2.42

UDC 669.054

A. N. TYNYNKYA

Ukraine, Odessa National Polytechnic University

E-mail: polalek562@gmail.com

COMPUTATION OF QUANTITY OF SPARE PARTS BY THE FAILURE FREQUENCY

One way to increase the level of reliability is to create sets of spare parts, units, devices to be efficiently replaced in the failed system. System availability ratio is very important for consumers. It depends on the ability to quickly replace a failed component. In order for this system to support function at the proper level, effective management of these spare parts reserve is required. Therefore, acquisition of spare parts is rightly considered as a particular problem of the theory of inventory management, the solution of which is important for ensuring service continuity of a system and, in a number of cases, for achieving the required safety.

The unpredictability of failure of equipment and its parts has a great impact on this problem. One way to reduce the level of unpredictability is to maintain a sufficient number of spare parts, which leads to an increase in the cost of inventory. A cheaper way is to estimate the necessary spare parts using one of the available forecasting models.

Because of this unpredictability, the nature of the demand for spare parts is stochastic, thus the models that establish an unchanged quantity of spare parts for the entire life cycle of the product only depending on the number of equipment in operation do not always provide satisfactory estimates. For this reason, it is preferable to use the models dealing with the estimation of the required number of spare parts based on such parameters as reliability of spare parts, complexity and quality of service, life expectancy, intensity of operation, maintenance costs, etc.

Based on the analysis of reliability and failure rate of technical systems, the required number of spare parts is estimated in this article at the time of the expected failure or when reliability falls below a predetermined level. With the help of the obtained formula, calculations can be made for single sets of spare parts for repair, maintenance and adjustment.

Keywords: reliability, spare parts, forecasting method, Rayleigh distribution, failure level.

REFERENCES

1. Gopalakrishnan P., Banerji A. K. *Maintenance and Spare Parts*. India, PHI Learning Pvt. Ltd, 2003, p. 400.
2. Ryzhikov Yu. I. *Teoriya ocheredei i upravlenie zapasami* [The theory of queues and inventory management.] St. Petersburg: Piter, 2001, 384 p. (Rus)
3. Ben-Daya M, Duffuaa SO, Raouf A. *Maintenance, Modeling and Optimization*. New York, Springer Science & Business Media, 2012, p. 474.
4. Manzini R, Regattieri A, Pham H, Ferrari E. *Maintenance for Industrial System*. New York, Springer Science and Media, 2009, p. 463.
5. Cherkosov G. N. [The problem of spare parts and tools, and the task of forming a new section of the theory of reliability of recoverable systems]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU, Ser. «Informatika. Telekommunikatsii, Upravleniye»*, 2011, no 6 (138), pp. 136-153. URL: ntv.spbstu.ru/issue/t6-1.138. 2011.pdf. (Rus)
6. Cherkosov G. N. *Otcenka nadiozhnostisistem s uchotom ZIP* [Evaluation of the reliability of systems with allowance for spare parts]. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2012, 480 p. (Rus)

7. Cherkosov G. N. [On the problem of calculating the reliability of recoverable systems in the presence of spare parts.] Part 1. *Reliability*, 2010, no 3, pp. 29-39. (Rus)
8. Ryzhikov Yu. I. [Planning of recoverable spare parts]. *Integrated logistics*, 2011, no 1, pp. 34-36. (Rus)
9. Antonov A. V., Plyaskin A. V., Tataev H. N. [On the optimization of a set of spare products, taking into account the partial development of their resource]. *Modern problems of science and education*. 2012, no 1. URL: <http://www.science-education.ru/en/article/view?Id=5547>. (Rus)
10. Lysenko I. V., Ptushkin A. I., Sokolov B. V. [The technique of synthesizing a set of spare parts based on dynamic programming]. *Izv. Vuzov. Priborostrojenie*, 2013, vol. 56, no 3, pp. 16-21. (Rus)
11. Wang H, Pham H. *Reliability and Optimal Maintenance*. Springer Series in Reliability Engineering. London, Springer, 2006, p. 295. <http://dx.doi.org/10.1007/b138077>
12. Kulbak L. I. *Osnovy raschota obespecheniya elektronnoi aparatury zapasnymi chastiami* [Fundamentals of calculating the provision of electronic equipment with spare elements]. Moscow, Sov. Radio, 1970, 208 p. (Rus)

Описание статьи для цитирования:

Тынныка А. Н. Определение количества запасных элементов технических систем по частоте отказов. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2018, № 2, с. 42—45. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.42>

Cite the article as:

Tynnyka A. N. Computation of quantity of spare parts by the failure frequency. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 2, pp. 42-45. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.42>

УДК 001.89

Д. т. н. Г. О. ОБОРСЬКИЙ, к. т. н. В. С. ШОБІК

Україна, Одеський національний політехнічний університет

E-mail: shobik@onu.ua

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (до 100-річного ювілею)



Одеський національний політехнічний університет було засновано у 1918 році рішеннями Одеської міської Думи і Одеського відділення технічного товариства як Одеський політехнічний інститут (**ОПІ**) за узгодженням з урядом Української Держави під керівництвом гетьмана Павла Скоропадського. День початку занять — 18 вересня 1918 р. — є днем народження закладу.

У 20 — 30-х роках ХХ сторіччя колектив ОПІ став опорним центром на Півдні України з переобладнання народного господарства на новій технічній основі і вирішував великий обсяг кадрових і технічних проблем для промисловості та транспорту країни.

У становлення та розвиток інституту великий внесок зроблено такими видатними вченими світового рівня, як Л. І. Мандельштам, Н. Д. Папалексі, Ч. Д. Кларк, лауреатом Нобелівської премії І. Є. Таммом, висококваліфікованими і досвідченими професорами В. І. Алімовим, Б. І. Ніколаї, Н. Е. Ардадуrowим, Д. К. Добросердовим, С. О. Шатуновським та іншими. Першим ректором Одеського політехніч-

ного інституту був генерал-лейтенант, професор математики Михайлівської артилерійської академії А. О. Нілус.

В різні роки на базі ОПІ було створено низку нинішніх вищих навчальних закладів, це Одеський національний морський університет, Одеська національна академія зв'язку, Одеський національний економічний університет, Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеський державний аграрний університет. В 1960-ті роки філія ОПІ у Севастополі була перетворена у вищий навчальний заклад — Севастопольський національний технічний університет.

У 1933 р. ОПІ було перетворено в Одеський індустріальний інститут (**ОІІ**).

У роки другої світової війни більшість професорсько-викладацького складу, студентів і співробітників ОІІ взяли участь у героїчній обороні Одеси та у подальших бойових діях на фронтах проти німецько-фашистських загарбників. Сам інститут в останні дні оборони Одеси був евакуйований до Пензи, де з 1 жовтня 1943 р. почав освітню і наукову діяльність. А вже 18 квіт-

ня 1944 р., за тиждень після визволення Одеси, ОП повернувся до роботи у рідному місті, продовжуючи підготовку технічних кадрів, а також вирішування технічних і народногосподарських проблем.

30 квітня 1945 р. Постановою уряду СРСР ОП знов було перетворено в Одеський політехнічний інститут.

У 1968 р. за успіхи у підготовці інженерних кадрів і розвиток науки Указом Президії Верховної Ради УРСР ОПІ нагороджено Почесною Грамотою.

У 1971 р. за заслуги у підготовці фахівців для народного господарства країни Указом Президії Верховної Ради СРСР ОПІ нагороджено орденом Трудового Червоного Прапора.

У 1977 р. Постановою Ради міністрів і республіканської Ради професійних спілок України за досягнення найкращих показників колектив ОПІ було занесено на Дошку пошани.

Постановою Кабінету Міністрів України від 13 серпня 1993 р. № 646 ОПІ набув статусу державного університету і був перейменований в Одеський державний політехнічний університет (**ОДПУ**). У цьому ж році на його базі створено навчально-науковий комплекс «Одеський політехнічний університет», до якого крім університету увійшли коледжі, технікуми, ліцеї, гімназії та школи м. Одеси і Південного регіону.

16 вересня 1998 р. колектив ОДПУ за вагомий внесок у підготовку висококваліфікованих кадрів, розвиток науки, техніки і технологій був нагороджений Почесною грамотою Кабінету Міністрів України і пам'ятним знаком.

Указом Президента України від 7 серпня 2001 р. № 591 університету надано статус національного з найменуванням «Одеський національний політехнічний університет» (**ОНПУ**).

У період з 2004 до 2008 року на виконання відповідних наказів Міністерства освіти і науки України до складу ОНПУ як його відокремлені структурні підрозділи увійшли Одеський автомобільно-дорожній технікум, Херсонський політехнічний коледж, Березівське вище професійне училище і Новокаховський електромеханічний технікум. Останній при цьому набув статус коледжу та найменування «Новокаховський політехнічний коледж Одеського політехнічного університету».

За роки свого існування ОНПУ із політехнічного інституту, у якому при його створенні було усього 3 факультети, перетворився у великий навчально-науковий комплекс, у складі якого є 13 навчально-наукових інститутів, 2 факультети та 4 вищих навчальних заклади I і II рівня акредитації, де працює біля 1500 високок-

валіфікованих викладачів, серед яких 37 академіків, 8 членів-кореспондентів галузових міжнародних і республіканських академій, майже 130 професорів і докторів наук, 464 доценти і кандидата наук, 12 заслужених діячів науки і техніки та заслужених працівників освіти України, 46 відмінників освіти України. В університеті працює 9 спеціалізованих Рад із захисту дисертацій (докторських — 6, кандидатських — 3).

У структурі університету створено українсько-німецький, українсько-іспанський та українсько-польський інститути, студенти яких мають змогу проходити мовну та виробничі практики за кордоном, брати участь у програмах академічного обміну з вишами-партнерами та отримувати стипендії для продовження навчання в Німеччині, Іспанії та Польщі.

ОНПУ бере активну участь у програмах академічної мобільності Європейського Союзу Erasmus Mundus (три програми у 2012–2016 рр.) та Erasmus+ (п'ять програм у 2016/17 навчальному році). Починаючи з 2016 року 33 студенти, аспіранти та викладачі ОНПУ були учасниками кредитної академічної мобільності за 5 проектами цих програм. Університет має договори з 20 університетами Європи зі спільної підготовки магістрів за програмами «подвійний диплом» (Німеччина, Австрія, Іспанія, Польща, Швеція та Франція).

Успішну навчальну і наукову діяльність університету забезпечують міцна сучасна матеріально-технічна база і розвинута соціальна інфраструктура. До оснащення навчальних лабораторій широко залучаються зарубіжні фірми та підприємства. В ОНПУ відкрита «Академія BOSCH», яка має сучасне обладнання з діагностики автомобілів, працюють лабораторії з обладнанням відомих фірм: Schneider Electric, Moeller, Danfoss, Wiessmann, Неткрекер, Люксоф та інші. З метою поліпшення якості підготовки фахівців для атомних електричних станцій України в університеті працюють навчально-науковий центр ядерної енергетики АН України та науково-технічний центр «НАЕК Енергоатом».

У 1918 р. в ОПІ навчалось 906 студентів. Нині в навчальних структурних підрозділах університету навчається майже 20 тисяч студентів, аспірантів, слухачів курсів та ін. Перший випуск ОПІ склав 20 інженерів. У 2016 р. ОНПУ підготовлено 397 магістрів, 765 спеціалістів, 2072 бакалаври, 945 молодших спеціалістів, 100 професійних робітників. Університет готує фахівців з 32 спеціальностей та 75 спеціалізацій.

За роки існування закладу підготовлено понад 100 тисяч інженерів, бакалаврів та магістрів для народного господарства України та більше 3 тисяч спеціалістів для 103 країн світу.

Вчені і спеціалісти ОНПУ здійснюють вагомий внесок у різноманітні галузі науки і техніки. Науково-дослідна робота в університеті зосереджена у 15 відомих і визнаних наукових школах. У 15 спеціалізованих науково-дослідних лабораторіях виконуються наукові дослідження з пріоритетних наукових напрямів: безпеки атомних електричних станцій, ресурсозбереження, охорони навколишнього середовища, фундаментальні дослідження в галузі математики, фізики, механіки, інформатики і телекомунікацій, технології нових матеріалів, робототехніки, автоматизації, приладобудування та інших.

Так, наприкінці 1990-х років вперше в Україні група науковців ОНПУ під науковим керівництвом професора М. В. Максимова розробила і впровадила на Запорізькій АЕС автоматичний комплекс з перевантаження ядерного палива. Державними преміями України в галузі науки і техніки у 2001 р. були нагороджені професори О. Ф. Дашенко та А. В. Усов за розробку технології виробництва волоконно-оптичних кабелів світового рівня, у грудні 2015 р. — група науковців, до складу якої входило семеро представників наукової школи ОНПУ: професори А. С. Мазуренко і В. І. Скалозубов, доцент Ю. О. Комаров, старший викладач В. М. Колиханов і провідний інженер Т. В. Габлая за розробку науково-технічного проекту «Комплекс методів та заходів забезпечення безпечної експлуатації та ефективності АЕС України».

З метою впровадження у виробництво наукових розробок вчених в університеті з 2015 року працюють науковий парк та центр трансферу технологій.

За результатами рейтингу серед понад 400 вищих навчальних закладів країни «Топ-200 Україна», що проводиться Міжнародною академією і Академією педагогічних наук України, ОНПУ протягом останніх 5 років входить до 10 кращих технічних і технологічних закладів України.

Університет має багаторічні стабільні міжнародні зв'язки і високу репутацію за кордоном та є членом низки міжнародних організацій, а саме:

- Асоціація європейських університетів EUA (з 1994 року);
- Асоціація університетів Центральної і Східної Європи (з 2005 року);
- Асоціація євразійських університетів EURAS (з 2008 року);
- Європейська мережа ядерної освіти ENEN (з 2012 року);
- Європейська асоціація з безпеки експлуатації атомних реакторів II та III поколінь NUGENIA (з 2015 року);
- Європейська регіональна мережа з навчання та стажування у галузі атомної енергетики STAR-Net (з 2016 року).

З 2000-го року в університеті успішно працює кафедра ЮНЕСКО «Інтелектуальне моделювання та адаптація нетрадиційних технологій навчання до проблем сучасної освіти та соціального розвитку».

Університет плідно співпрацює з навчальними, науковими і виробничими центрами 30 країн Європи, Азії, Близького Сходу, Північної та Південної Америки і гідно представляє нашу державу на міжнародній арені вищої освіти.

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

Баранюк Александр Владимирович, канд. техн. наук, ст. преподаватель, НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»

Болтенков Виктор Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет

Галчѐнков Олег Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет

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

Горох Геннадий Георгиевич, канд. техн. наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск

Железко Борис Александрович, канд. техн. наук, доцент, Белорусский государственный экономический университет, г. Минск

Пилипенко Владимир Александрович, докт. техн. наук, заместитель директора, Филиал НТИЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ», г. Минск

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

1. К рассмотрению принимаются статьи прикладной направленности на русском, украинском или английском языке, которые не были опубликованы ранее и не переданы для публикации в другие издания.
2. В журнале публикуются научно-практические и экспериментальные работы по тематическим направлениям, с которыми можно ознакомиться на сайте журнала.
3. Все поступающие к рассмотрению материалы проходят 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 (подробнее см. на сайте журнала)
7. Статья должна быть четко структурирована, а поставленная задача, выводы и название — согласованы между собой.
8. При написании статьи следует обратить внимание на следующее:
 - название рукописи должно быть конкретным, информативным и в то же время по возможности кратким;
 - аннотация должна быть достаточно лаконичной (от 50 до 100 слов) и в то же время информативной, соответствовать содержанию статьи и показывать, что сделано в работе;
 - ключевые слова должны быть подобраны так, чтобы вероятность нахождения статьи через поисковые системы была как можно выше;
 - описание результатов, представленных на рисунках, должно включать в себя интерпретацию этой информации, а не сводиться к дублированию подрисовочных подписей или к простому описанию приведенных зависимостей. Например, вместо таких неинформативных фраз, как «На рис. 1 приведен график зависимости A от B . Из рисунка видно, что при возрастании B значение A монотонно уменьшается.», следует дать пояснение типа «Как видно из рис. 1, при возрастании B значение A монотонно уменьшается, что свидетельствует о том, что ...»;
 - выводы (заключение) не должны повторять аннотацию — в них нужно привести результаты работы (а не краткое содержание статьи). Правильно сформулировать выводы помогут такие фразы, как «Проведенное исследование показало, что ...», «Разработанная методика позволяет ...», «Авторами установлено, что...» и др.
9. Список «Использованные источники» (образец см. на сайте) формируется в порядке их упоминания в тексте.
10. В конце статьи нужно привести тематическую информацию (название, ФИО авторов, место работы, аннотацию и ключевые слова) на украинском, английском и русском языках. При этом переводные варианты аннотации должны быть представлены в расширенном виде (200—250 слов) и отражать все структурные элементы статьи (актуальность темы, постановку задачи, описание решения, выводы и практическую значимость).
11. Редакция не предъявляет жестких требований к объему статьи — главное, чтобы он был оправдан.
12. При наборе текста статьи использование программ типа MathType допускается только в тех случаях, когда Word бессилен, например при наборе специальных знаков над буквенными обозначениями, подкоренных выражений, пределов интегрирования, суммирования и т. п.
13. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а терминология соответствовать общепринятой. Все использованные символы и аббревиатуры нужно пояснить при первом их упоминании в тексте.
14. С точки зрения удобства верстки желательно, чтобы объем иллюстраций не превышал 40% от общего объема статьи.
15. В начале статьи, кроме ее названия и информации об авторах (ФИО, ученые степени, место работы, e-mail), необходимо указать ее индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК).
16. Материалы статьи направляются по e-mail <tkea@optima.com.ua>. В тексте письма нужно указать ФИО авторов, название статьи и соответствующее тематическое направление (см. п. 2), а к письму прикрепить подписанные Авторское соглашение и Карточки автора (см. на сайте).
17. При цитировании статей из журнала «ТКЭА» его название на латинице должно быть представлено транслитерацией, а именно: «Tekhnologiya i Konstruirovane 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).



К статье
«Одеський національний
політехнічний університет
(до 100-річного ювілею)»



Номер готовили
New Delhi, Киев, Минск, Одесса,
Харьков, Херсон, Черновцы.



Пишите
Подписывайтесь
Читайте