

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ УКРАИНЫ  
"КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ"

---

# Електроніка і зв'язь

Електроніка та зв'язок  
Electronics and Communications

Научно-технический журнал  
Основан в 1995 году



6(59) • 2010

Часть 1

---

---

# Электроника и связь

Научно-технический журнал  
Свидетельство о регистрации КВ № 9314 от 03.11.2004 г.

---

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Ю. И. Якименко**, д-р техн. наук, проф., акад. НАН Украины

## ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

**А. В. Кириленко**, д-р техн. наук, проф., акад. НАН Украины

**В. Я. Жуйков**, д-р техн. наук, проф.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**В. Г. Абакумов**, д-р техн. наук, проф.

**В. М. Безрук**, д-р техн. наук, проф.

**А. В. Борисов**, канд. техн. наук, проф.

**А. Ф. Буткевич**, д-р техн. наук, проф.

**В. Г. Вербицкий**, д-р техн. наук, с. н. с.

**А. Г. Власюк**, д-р техн. наук, проф.

**Г. С. Воробьев**, д-р физ.-мат. наук, проф.

**С. В. Денбновецкий**, д-р техн. наук, проф.

**В. С. Дидковский**, д-р техн. наук, проф.

**Г. Ф. Зайцев**, д-р техн. наук, проф.

**Ю. М. Калниболотский**, д-р техн. наук, проф.

**К. В. Ковальчук**, канд. физ.-мат. наук

**П. П. Лошицкий**, д-р техн. наук, проф.

**А. Н. Лысенко**, д-р техн. наук, доц.

**В. Ф. Мачулин**, д-р физ.-мат. наук, проф., акад. НАН Украины

**О. Н. Петрищев**, д-р техн. наук, проф.

**В. В. Пилинский**, канд. техн. наук, проф.

**Л. Д. Писаренко**, д-р техн. наук, проф.

**Ю. М. Поплавко**, д-р физ.-мат. наук, проф.

**И. Н. Пустинский**, д-р техн. наук, проф.

**П. Г. Стахив**, д-р техн. наук, проф.

**Р. Стржелецкий**, проф.

**В. И. Тимофеев**, д-р техн. наук, проф.

**Г. И. Чурюмов**, д-р техн. наук, проф.

**С. А. Харитонов**, д-р техн. наук, проф.

**Ю. С. Ямненко**, д-р техн. наук, проф.

**В. П. Яценко**, д-р мед. наук, проф.

## ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР

**А. В. Коржик**, канд. техн. наук, доц.

## ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР

**Т. А. Полобюк**

## ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

**Н. Ю. Филиппова**

*Рекомендовано к печати Ученым советом ФЭЛ НТУУ «КПИ»  
(Протокол № 11/10 от 29.11.10)*

## Адрес редакции:

03056, г. Киев-56, ул. Политехническая, 16, корпус 12, к. 116

Тел. +38(044)454-94-39, e-mail: journal\_el\_com@fel.ntu-kpi.kiev.ua

ISSN 1811-4512

© Национальный технический университет  
Украины «КПИ», 2010

---



## Содержание

## Часть 1

### ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

<i>Здольник С.Н., Ильченко В.И., Петровский В.Я., Чернякова И.В.</i>	<b>Электропроводность титаносодержащих СИАЛОНов, полученных с различным темпом охлаждения.....</b>	<b>5</b>
--	--	----------

<i>Белоусько А.В., Коваль В.М., Шмырева А.Н.</i>	<b>Функциональные свойства кремниевых композитов, легированные иттрием, для тонкопленочных фотоэлектрических преобразователей .....</b>	<b>12</b>
--	---	-----------

### ТЕОРИЯ СИГНАЛОВ И СИСТЕМ

<i>Палагин В.В.</i>	<b>Полиномиальные алгоритмы обнаружения сигналов на фоне коррелированных негауссовских помех.....</b>	<b>20</b>
---------------------	---	-----------

<i>Ивченко О.В.</i>	<b>Оцінювання дисперсії корельованої ексцесної завади методом максимізації полінома.....</b>	<b>27</b>
---------------------	--	-----------

### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

<i>Орлов А.Т., Розоринов Г.Н., Розоринова Е.Г.</i>	<b>Особенности расчета потерь, возникающих при соединении оптических волокон .....</b>	<b>32</b>
--	--	-----------

### АКУСТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

<i>Савин В.Г., Шарапов В.М., Моргун И.О.</i>	<b>Математическое моделирование работы цилиндрического пьезокерамического трансформатора с двумя секциями генераторных электродов.....</b>	<b>38</b>
--	--	-----------

<i>Коржик А.В.</i>	<b>Пространственная избирательность многомодовых электроупругих цилиндрических систем.....</b>	<b>43</b>
--------------------	--	-----------

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

<i>Ищенко А.В., Рогоза В.С.</i>	<b>Агентные технологии: гибридные интеллектуальные системы .....</b>	<b>52</b>
-------------------------------------	--	-----------

### СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ, СВЯЗИ И ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

<i>К.Г. Кебкал</i>	<b>Усовершенствование протокола обмена данными по гидроакустическому каналу связи .....</b>	<b>62</b>
--------------------	---	-----------

### ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ

<i>Борисов А.В., Воеводин С.В., Волхова Т.Л., Тиняков В.Г.</i>	<b>Имитационное моделирование и виртуальные измерения в лабораторном практикуме.....</b>	<b>70</b>
--	--	-----------

---

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

<i>Бондаренко В.Н., Бондаренко Н.А.</i>	<b>Call-центр с поддержкой IP-телефонии на платформе Intel Dialogic.....</b>	<b>84</b>
---	--	-----------

## ИНФОРМАЦИЯ

	<b>Всеукраїнська відкрита студентська олімпіада з «Програмування мікропрограмних автоматів та мікроконтролерних систем» в НТУУ «КПІ».....</b>	<b>87</b>
	<b>Visit of Swedish lecturer to Faculty of Electronics .....</b>	<b>92</b>
	<b>Прийняття до захисту докторської дисертації.....</b>	<b>94</b>

---



## Твердотельная электроника

УДК 537.312.6

С.Н. Здольник<sup>1</sup>, В.И. Ильченко<sup>2</sup>, канд. техн. наук, В.Я. Петровский<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, И.В. Чернякова<sup>1,2</sup>

### Электропроводность титаносодержащих СИАЛОНов, полученных с различным темпом охлаждения

Установлено, что технологический режим, а именно, скорость охлаждения образцов после горячего прессования, влияет на морфологию и дефектность структуры многокомпонентного материала, а электропроводность является ключевым структурочувствительным параметром.

**It was established that the technological cooling mode after hot-pressing affects the morphology of a multicomponent material and its defect structure formation. It was shown that d.c. conductivity is a key responsible parameter.**

**Ключевые слова:** электропроводность, нитрид кремния, оксид титана, гидрид титана, горячее прессование.

#### Введение

Технология перевернутого кристалла (Flip-Chip) интенсивно развивается для сверхбольших интегральных микросборок. К подложкам таких микросборок предъявляются жесткие требования по механическим, электрическим и химическим свойствам. Эти требования можно выполнить, используя подложки из  $Al_2O_3$  или  $AlN$ . Также необходимые вышеуказанные свойства может обеспечить горячепрессованная керамика на основе нитрида кремния [1–3]. Увеличение содержания окиси алюминия в этой керамике повышает твердость, прочность при статическом и динамическом изгибе, уменьшает пористость [4]. Керамика на основе  $Si_3N_4$ , содержащая примеси Si, Al, O и N, была названа «СИАЛОН» по химическим символам этих элементов. Процесс введения в материал различных примесей может приводить к изменению в материале механизмов проводимости, появлению ловушечных уровней, способных на длительное время (до 10 лет) локализовать носители [5]. Кислород и алюминий в структуре СИАЛОНа являются ловушками для дырок и электронов, и при определенных концентрациях создают кластеры точечных дефектов, играющие основную роль в проводимости материала.

Небольшие добавки соединений титана в шихту для получения СИАЛОНов способствуют снижению температуры и расширению диапазона температур существования расплава зернограничной фазы при получении материала [6].

С участием титана происходит процесс образования твердых растворов, которые являются растворами эвтектоидного типа, и могут распадаться при медленном снижении температуры после окончания выдержки при спекании или существовать в материале в случае охлаждения заготовок со средней и большой скоростью.

Образование жидкости между зернами стимулирует протекание процессов растворения и осаждения через жидкую фазу, в результате чего можно получить материалы, как с мелкозернистой структурой, так и с мало дефектными границами кристаллитов. Скорость охлаждения материала определяет динамику кристаллизационных процессов. Чтобы получить материалы с оптимальным сочетанием свойств, должно быть индивидуально оценено влияние всех факторов и подобран их баланс.

Соединения титана можно вводить в материал в виде  $TiO_2$  или  $TiH_2$ . Применение  $TiO_2$  в диэлектриках подобного состава предотвращает аномальный рост зерен материала при спекании  $Si_3N_4$  [7–9], а также улучшает его электрические свойства за счет уменьшения тока утечки. Для повышения трещиностойкости нитрид кремния легируют соединениями тугоплавких металлов с более высоким коэффициентом диффузии, например  $TiH_2$  [10]. Водород активирует процесс уплотнения материала.

Информация о том, воздействие каких технологических факторов на СИАЛОН приводит к усилению или ослаблению процесса генерации дефектов, какой тип ловушечных уровней возникает в горячепрессованном СИАЛОНе, и каким образом ловушки участвуют в процессах электропереноса и поляризации керамических композитов, в литературе не систематизирована, носит отрывочный характер и нуждается в уточнении.

Поэтому целью данной работы является исследование электропроводности композитов на основе нитрида кремния с добавками титана (оксид, гидрид) при различной скорости охлаждения после горячего прессования.

#### 1. Методы получения и исследования образцов

В качестве исходного сырья для получения материалов использовались порошки  $\beta$ - $Si_3N_4$ ,

полученные методом печного синтеза (Бакинский завод порошковой металлургии, г. Баку). Зернограничная фаза формировалась из химически чистых порошков  $Al_2O_3$  (Николаевский глиноземный завод, Украина), примеси  $SiO_2$  в исходном  $Si_3N_4$ , а также  $TiO_2$  и  $TiH_2$  (Николаевский глиноземный завод, Украина).

Образцы для исследований готовились из шихты состава  $Si_3N_4:Al_2O_3:TiO_2$  ( $TiH_2$ ) в соотношении 92:5:3 по объему, методом слоисто-градиентной технологии [11]. Перед прессованием шихта увлажнялась водой. Температура прессования контролировалась оптическим пирометром ОПИР-17 по стенке графитовой матрицы через отверстие в экране с точностью  $\pm 10$  К и составляла около 1973 К. Изотермическая выдержка составляла 30 мин под давлением 20 МПа. Скорость охлаждения образцов варьировали в диапазоне 10...90 К/мин. Измерение электрофизических и механических характеристик выполнялось на образцах  $10 \times 10 \times 5$  мм.

Электропроводность образцов на постоянном токе измерялась электрометром с входным сопротивлением  $10^{12}$  Ом при рабочем напряжении 100 В в режиме нагрев-охлаждение образцов во внешней печи со скоростью изменения температура  $4 \pm 1$  К/мин в измерительной ячейке, обеспечивая постоянный контакт с усилием 10 кПа [12].

Рентгенофазовый анализ проводился с помощью рентгеновской установки DRON-3. Относительное количество фаз  $V_\alpha$  и  $V_\beta$  определялось по отношению их пиков интенсивности друг к другу (выражение (1)):

$$\frac{I_{HKL}^\alpha}{I_{H_1K_1L_1}^\beta} = K_{\alpha\beta} \frac{V_\alpha}{1-V_\alpha}, \quad (1)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – присутствующие фазы;  $H$ ,  $K$ ,  $L$  – индексы Миллера. Коэффициент взаимодействия  $K_{\alpha\beta}$  определялся экспериментально, путем сравнения рентгеновских пиков известных соединений. Относительная объемная доля одной из двух фаз определялась в соответствии с выражением

$$V_\beta = 1 - V_\alpha. \quad (2)$$

## 2. Электропроводность на постоянном токе

Результаты исследования температурной зависимости электропроводности приведены на рис. 1, 2.

При нагреве образцов наблюдается нелинейная зависимость электропроводности от

температуры, которая связана с освобождением слабо связанных носителей, локализованных на уровнях прилипания.

На кривых температурной зависимости электропроводности (рис. 1, 2), полученных при спаде температуры, мы видим Аррениусовский вид зависимости (проводимость осуществляется носителями, термически активированными с локализованных уровней в запрещенной зоне), отличающийся величиной энергии активации для различных скоростей охлаждения композита после горячего прессования. В этой зависимости  $E_a$  характеризует глубину расположения уровней локализации носителей. Информацию об истинном расположении уровней локализации носителей  $E_a$  в керамике  $Si_3N_4$  можно получить из температурной зависимости проводимости:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a / kT), \quad (3)$$

где  $\sigma_0$  – параметр, 1/Ом·см;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура, К.

На графике температурной зависимости электропроводности можно выделить две характеристические зоны, отличающиеся величиной  $E_a$ : зону  $E_1$  в диапазоне температур 373...623 К и зону  $E_2$  в диапазоне температур 623...873 К.

Рассчитана величина энергии активации носителей в материалах с добавками  $TiO_2$  и  $TiH_2$ , значения которой при различных скоростях охлаждения после горячего прессования (ГП) приведены на рис. 3 и 4. Из рис. 3, 4 следует, что существует несколько характерных областей корреляционной связи.

Если электрическое поле приложено вдоль направления ГП (рис. 3, а, 4, а), можно выделить две характеристические зоны, разделенные критической скоростью охлаждения, при которой начинается кристаллизация структурных компонентов. Это скорость 30 и 50 К/мин для керамики  $Si_3N_4-TiO_2$  и  $Si_3N_4-TiH_2$ , соответственно. При легировании материала добавками  $TiH_2$  и скорости охлаждения больше критической, глубина залегания энергетического уровня не зависит от технологической скорости охлаждения и составляет  $0,8 \pm 0,05$  эВ. Для материалов с добавками  $TiO_2$  также наблюдается независимость глубины залегания двух энергетических уровней от скорости охлаждения:  $0,8 \pm 0,05$  эВ, и более глубокого –  $1,2 \pm 0,05$  эВ.

При скорости охлаждения меньше критической (рис. 3, а, 4, а), наблюдается иная ситуация. Для материалов с добавками  $TiH_2$  существует один стабильный уровень с глубиной

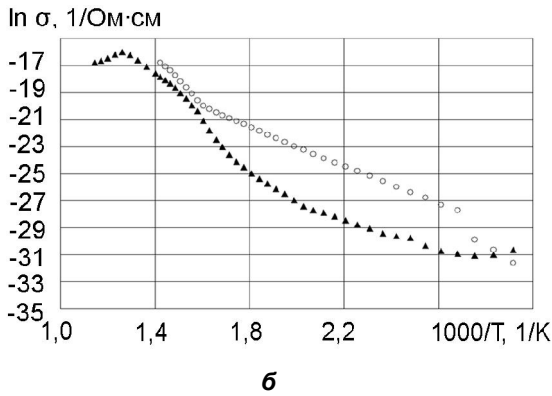
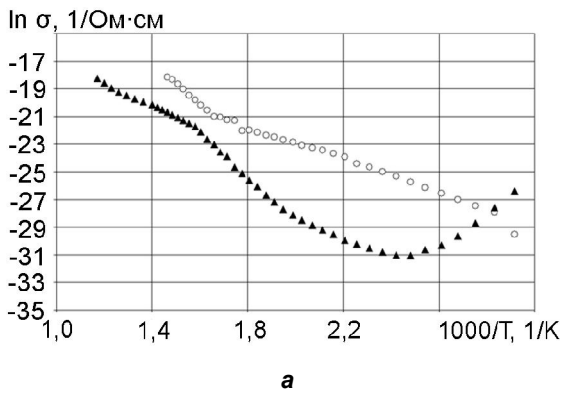


Рис. 1. Температурные зависимости проводимости образцов с добавками  $\text{TiO}_2$  при нагреве ( $\blacktriangle$ ) и охлаждении ( $\circ$ ): а –  $V_{\text{охл}} = 30$  К/мин; б –  $V_{\text{охл}} = 90$  К/мин

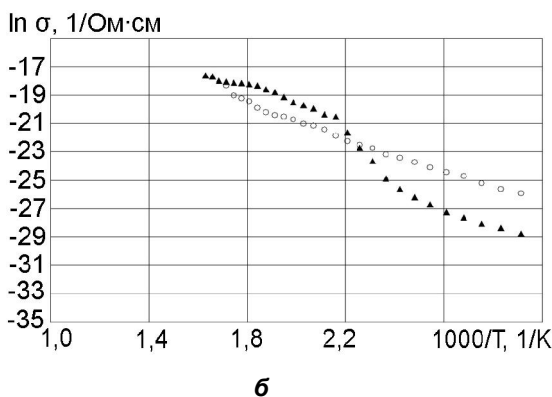
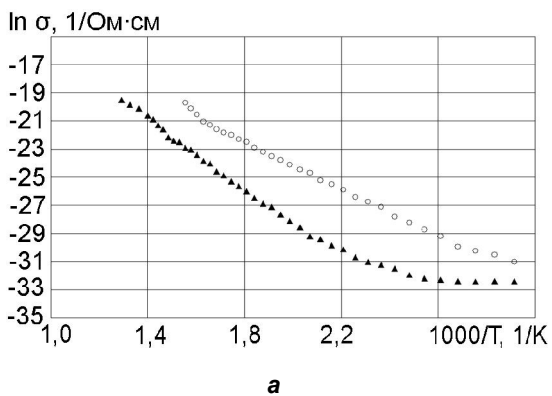


Рис. 2. Температурные зависимости проводимости образцов с добавками  $\text{TiN}_2$  при нагреве ( $\blacktriangle$ ) и охлаждении ( $\circ$ ): а –  $V_{\text{охл}} = 30$  К/мин; б –  $V_{\text{охл}} = 90$  К/мин

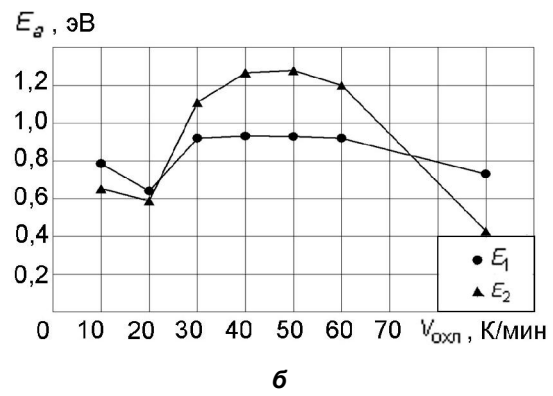
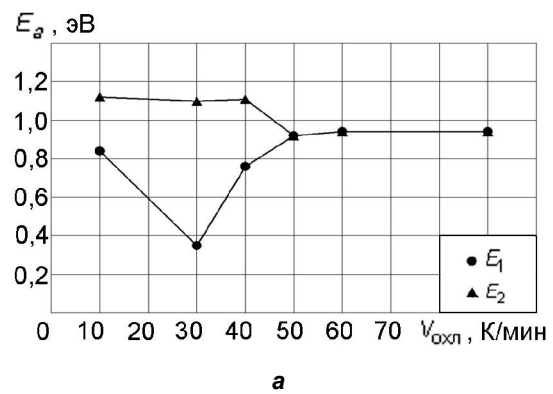


Рис. 3. Зависимость энергии активации от скорости охлаждения после горячего прессования композитов с добавкой  $\text{TiN}_2$ : а – параллельно ГП; б – перпендикулярно ГП

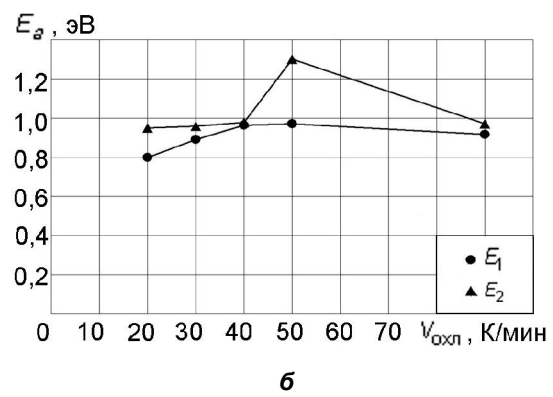
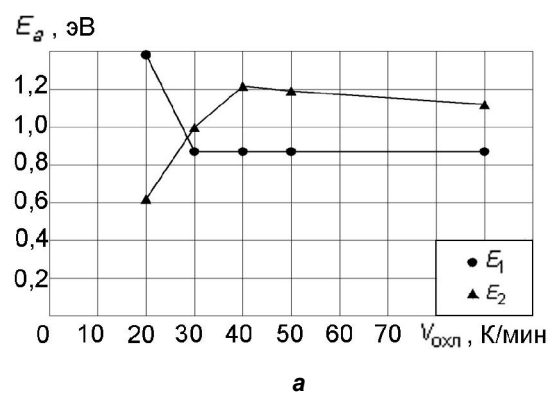


Рис. 4. Зависимость энергии активации от скорости охлаждения после горячего прессования композитов с добавкой  $\text{TiO}_2$ : а – параллельно ГП; б – перпендикулярно ГП

ной  $1,2 \pm 0,05$  эВ, не зависящий от технологической скорости охлаждения, и спектр ловушечных уровней с энергиями активации  $0,8 \pm 0,05$  и  $0,4$  эВ с минимальной глубиной залегания при  $V_{\text{охл}} = 30$  К/мин. В этом же случае при легировании материала  $\text{TiO}_2$  (рис. 4, а) наблюдается уменьшение энергии активации глубоких уровней от  $1,2$  до  $0,8$  эВ и увеличение энергии активации мелких уровней от  $0,4$  до  $1,2$  эВ.

При приложении электрического поля перпендикулярно направлению ГП в случае легирования добавками  $\text{TiH}_2$  (рис. 3, б) энергия активации носителей зависит практически квадратично от технологической скорости охлаждения. При скоростях охлаждения, близких к критической ( $V_{\text{охл}} = 30 \dots 60$  К/мин), существует два характерных уровня залегания носителей:  $1,2 \pm 0,05$  и  $0,8 \pm 0,05$  эВ. При увеличении технологической скорости охлаждения после ГП наблюдается такой же энергетический уровень  $0,8 \pm 0,05$  эВ и резкое уменьшение энергии активации глубоких уровней от  $1,2$  до  $0,4$  эВ. При легировании добавками  $\text{TiO}_2$  (рис. 4, б) возникают структурные компоненты, в запрещенной зоне которых присутствует спектр энергетических уровней с глубиной залегания от  $0,8$  до  $0,9$  эВ («хвост ловушечных состояний»). И лишь при скорости охлаждения, близкой к критической ( $V_{\text{охл}} = 50$  К/мин) появляется устойчивый энергетический уровень глубокого залегания с  $E_a = 1,2$  эВ.

Процесс захвата носителей на определенный уровень происходит при условии, что  $kT \leq E_a$  [13]. Поэтому случай, когда  $E_2 < E_1$  говорит о том, что в материале есть ловушки как для электронов, так и для дырок, а если  $E_1 < E_2$ ,

тогда только для электронов. При нагревании и охлаждении образцов заполнение или освобождение ловушек происходит с разной последовательностью: при нагревании освобождаются сначала мелкие уровни, потом глубокие, а при охлаждении в первую очередь заполняются более глубокие уровни, затем – более мелкие.

Нитрид кремния – компенсированный полупроводник, содержащий как донорные (за счет легирования кислородом), так и акцепторные (за счет легирования алюминием) уровни. Однако, авторы работ [14, 15] утверждают, что при температурах ниже  $773$  К преобладает проводимость р-типа, а при температурах выше  $1173$  К – n-типа.

Для пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  было показано [16], что при аморфизации нитрида кремния глубина залегания ловушки достигает  $1,2$  эВ, а подвижность носителей уменьшается. При возникновении в азотных тетраэдрах кристаллической структуры нитрида кремния N-H-связей, глубина ловушки уменьшается от  $2,5$  до  $1,4$  эВ. Такое преобразование происходит при введении водорода, источником которого могут быть протоны, освобожденные при диссоциации паров воды (из-за большой скорости нагревания при ГП до  $1073$  К вода, которая добавлялась в порошки для увлажнения, диссоциирует), или водорода, полученного при разложении гидрида титана. Гидрированный аморфный кремний  $\alpha\text{-Si:H}$  имеет  $\Delta E_0 \approx 1,4 \dots 1,6$  эВ. Размытые случайным полем уровни  $0,85 \dots 1,2$  эВ можно считать признаками образования пленок аморфного кремния [17, 18].

В работе [5] рассчитана глубина залегания уровней ловушек для различного типа дефектов (табл. 1).

**Таблица 1. Электронная структура ловушек [5]**

Вид дефекта	Тип ловушки	Глубина залегания уровня, эВ	Примечание
Двухкоординированный атом азота в аморфном $\text{Si}_3\text{N}_4$	Для электронов	0,8	Для дырок дефект является ловушкой только в обогащенном кислородом оксинитриде кремния
Кремний-кремниевая связь при образовании азотной вакансии в аморфном $\text{Si}_3\text{N}_4$	Для электронов	1,6	—
	Для дырок	1,0	—
Двухкоординированный атом кремния (силуленовый центр) в аморфном $\text{SiO}_2$	Для дырок	1,5	Электрон этим дефектом не захватывается

Таким образом, результаты расчетов и определения энергии активации носителей согласуются с данными рентгенофазового анализа (РФА) (рис. 5), это говорит о структурной чувствительности электропроводности. Можно утверждать, что технологический режим, а именно, ско-

рость охлаждения заготовок, влияет на морфологию микроструктуры и процесс образования пленок по границам зерен кристаллитов многокомпонентных материалов, в первую очередь – на степень кристаллизации зернограничных фаз.

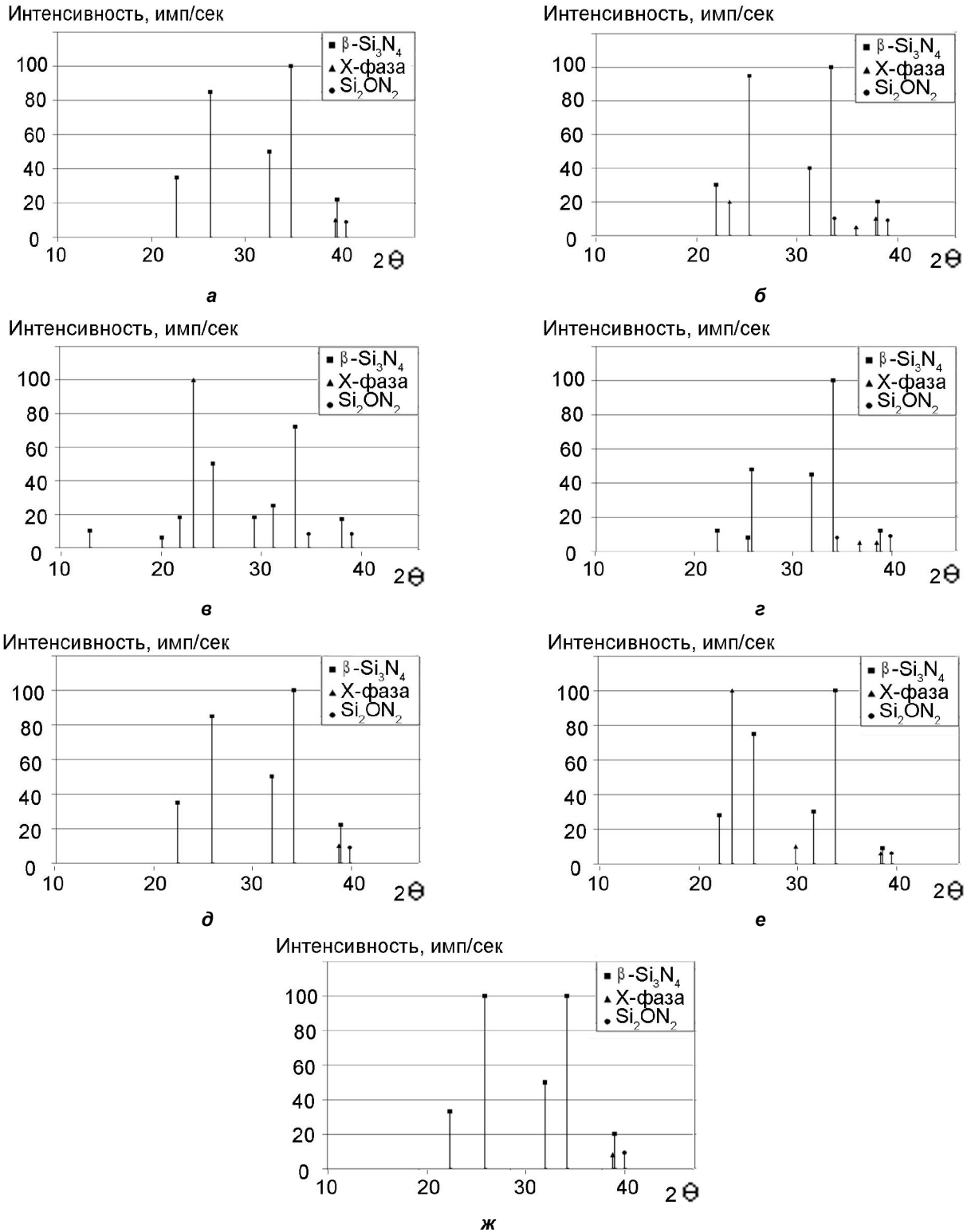


Рис. 5. Результаты РФА керамики  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с добавкой  $\text{TiO}_2$ , представленные характеристическими пиками: а –  $V_{\text{охл}}=10$  К/мин; б –  $V_{\text{охл}}=20$  К/мин; в –  $V_{\text{охл}}=30$  К/мин; г –  $V_{\text{охл}}=40$  К/мин; д –  $V_{\text{охл}}=50$  К/мин; е –  $V_{\text{охл}}=60$  К/мин; ж –  $V_{\text{охл}}=90$  К/мин

Через реакцию электропроводности определено, что при технологической скорости охлаждения больше критической, характерным дефектом структуры является двухкоординированный атом азота в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , представляющий собой ловушку для электрона с глубиной залегания 0,8 эВ. Образование в энергетической структуре уровней с энергией активации 1,2 эВ говорит об образовании двухкоординированного атома кремния в аморфном  $\text{SiO}_2$ , при чем в этом случае образуется ловушка для дырок. Уменьшение глубины залегания дефектных уровней от 1,2 до 0,8 эВ говорит о преобразовании оксида кремния в аморфный кремний, или о том, что в веществе преобладают кристаллиты  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с двухкоординированными атомами азота. А увеличение от 0,4 до 1,2 эВ – о зарождении дефектов в дегидрогенизованных пленках аморфного кремния, окислении этих пленок и образовании дефектов в аморфном  $\text{SiO}_2$ .

### Выводы

Установлено, что скорость охлаждения после горячего прессования композитов  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiO}_2(\text{TiH}_2)$  влияет на процессы кристаллизации, аморфизации, а, следовательно, и на электропроводность в них. Критическая скорость охлаждения, при которой начинается кристаллизация структурных компонентов, составляет 30 К/мин для композитов  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiO}_2$  и 50 К/мин для композитов  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiH}_2$ .

В результате анализа температурной зависимости электропроводности при охлаждении образцов получены данные о глубине залегания дефектных ловушечных уровней и их природе. Наиболее стабильным комплексом свойств обладают композиты, в которых присутствует моновушечный уровень с глубиной залегания  $0,8 \pm 0,05$  эВ, полученные при критической скорости охлаждения и выше.

### Литература

1. *Torti M.L.* Silicon Nitride and Silicon Carbide. Properties and shape Capability // Powder Metallurgy International. – 1974. – Vol.6, № 4. – P.186–189.
2. *Mazdiyani K.S., Cooke C.M.* Consolidation, Microstructure and Mechanical Properties of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  Doped with Rare - Earth Oxide // J. Amer. Ceram. Soc. – 1974. – Vol. 57, № 12. – P. 536–537.
3. *Осипова И.И., Погорелова Д.А.* Рекристаллизация порошков нитрида кремния при горячем прессовании // Порошковая металлургия. – 1982. – № 10. – С. 43–47.
4. *Карпинос Д.М., Михашук Е.П., Тоцкая Г.А.* Композиционный материал на основе нитрида кремния // Методы получения, свойства и области применения нитридов: Материалы семинара (13–15 февраля 1980 г.). – Рига: Зинатне, 1980. – С. 74.
5. *Гриценко В.А., Новиков Ю.Н., Шапошников А.В., Мороков Ю.Н.* Численное моделирование собственных дефектов в  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  // ФТП. – 2001. – Т.35, № 9. – С. 1041–1049.
6. *Петровский В.Я.* Роль жидкой фазы в формировании свойств силаноновой керамики // CERAMICS 45. – 1994. – P.41–50.
7. *Zhang J. Yuan J.S., Ma Y., Oates A.S.* Design Optimization of Stacked Layer Dielectrics for Minimum Gate Leakage Currents // Solid-State Electronics. – 2000. – Vol. 24., Issue 12. – P. 2165–2170.
8. *Kawai C., Yamakawa A.* Crystal growth of silicon nitride whiskers through a VLS mechanism using  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$  oxides as liquid phase // Ceramics International. – 1998. – Vol. 24., Issue 2. – P.135–138.
9. *Sabia R., Ukrainczyk L.* Surface Chemistry of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  Glasses as Determined by Titration of Soot Particles // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2000. – Vol. 277, Issue 1. – P. 1–9.
10. *Кузенкова М.А., Ивженко В.В.* Влияние добавок гидрида титана на структуру и прочность керамики на основе нитрида кремния // Методы получения, свойства и области применения нитридов: Материалы семинара (1–3 февраля 1984 г.). – Рига: Зинатне, 1984. – С.118.
11. *Петровский В.Я.* Физические принципы и технологические аспекты получения градиентных композитов на основе безкислородной керамики // Порошковая металлургия. – 1998. – № 7/8. – С. 50–54.
12. *Гнесин Г.Г., Кириленко В.М., Петровский В.Я.* Контроль качества горячепрессованных нитридокремниевых диэлектрических материалов // Порошковая металлургия. – 1982. – № 3. – С. 53–59.
13. *Левинштейн М.Б., Симин Г.С.* Барьеры (От кристалла до интегральной схемы). – М.: Наука, 1987. – 320 с. – Библиотечка «Квант», вып. 65.
14. *Thorp H.S., Sharif R.I.* Electrical conductivity in hot-pressed nitrogen ceramics // J. Mater. Sci. – 1976. – Vol.11, № 8. – P. 1494–1500.
15. *Thorp H.S., Sharif R.I. D.C.* electrical properties of hot-pressed nitrogen ceramics // J. Mater. Sci. – 1978. – Vol.13., № 2 – P. 441–449.
16. *Ржанов А.В.* Нитрид кремния в электронике. – Новосибирск: Наука, 1982. – 200 с.

17. Голикова О.А. Особенности структуры пленок аморфного гидрированного кремния, осажденных методом разложения силана на постоянном токе в магнитном поле // ФТП. – 1997. – Т.31, № 7. – С. 816–819.
18. Голикова О.А., Казанин М.М. Пленки аморфного гидрированного кремния с повышенной фоточувствительностью // ФТП. – 1999. – Т.33, № 1. – С. 110–113.

<sup>1</sup> *Институт проблем материаловедения НАН Украины им. И.Н. Францевича*

<sup>2</sup> *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

*Поступила в редакцию 1 июня 2009 г.*

УДК 621.382

А.В. Белоусько, В.М. Коваль, А.Н. Шмырева, д-р техн. наук

## Функциональные свойства кремниевых композитов, легированные иттрием, для тонкопленочных фотоэлектрических преобразователей

Рассмотрены перспективные направления развития тонкопленочных фотоэлектрических преобразователей. На основе проведенных комплексных исследований свойств тонких пленок кремниевых композитов, легированных иттрием, установлены факторы, обеспечивающие повышение их фоточувствительности в видимой и ультрафиолетовой области спектра. Показано, что изменение температуры осаждения пленок приводит к формированию разных типов морфологических структур от аморфной до нанокристаллической.

The promising directions of thin film photovoltaic technology are discussed. Using complex analysis of thin film silicon composites doped by yttrium, factors that increase their photoresponse in visible and UV light were defined. It was shown that changes in deposition temperature lead to formation of different types of structures from amorphous to nanocrystalline silicon.

**Ключевые слова:** кремниевый композит, редкоземельные металлы, иттрий, тонкие пленки, фотоэлектрический преобразователь.

### Введение

С улучшением свойств материалов, совершенствованием тонкопленочной технологии и новыми методами производства, а также с резким повышением интереса к фотоэлектрическим системам (ФЭС) в связи с высокой стоимостью природного горючего и явлением глобального потепления, тонкопленочные (ТП) ФЭС стали областью, куда активно инвестируют огромные средства на протяжении последних нескольких лет.

Основные типы ТП ФЭС приведены в табл. 1, где они сравниваются с традиционными решениями на основе кристаллического кремния [1–11].

Можно выделить четыре основные программы разработок, которые привели к их коммерческой реализации в настоящее время, а именно:

- Аморфный кремний. Это первое ТП решение, прошедшее коммерциализацию, и хорошо известное по его использованию в

калькуляторах. Со временем была увеличена эффективность, и сейчас материал используется в построении интегральных модулей и для других применений. Аморфный кремний остается сейчас наиболее широко используемым материалом для ТП ФЭС.

- Соединения CuInSe (CIS), CuInGaSe (CIGS). Этим материалам уделялось внимание еще с 1980 года, что сказалось на высокой эффективности солнечных элементов на основе данных соединений, которая находится на уровне эффективности солнечных элементов традиционной ФЭС. Некоторые фирмы уже сделали продукты на их основе коммерческими и в будущем хотят сосредоточиться на понижении стоимости и повышении выхода годных изделий.
- Соединения CdTe. Пока только несколько фирм используют ТП CdTe и ведут разработки в этом направлении. Одной из главных проблем при эксплуатации изделий на их основе является деградация CdTe в области контактов (металлических выводов) и токсичность исходных материалов.
- Органические материалы. В лабораторных условиях было получено множество тонкопленочных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе органических материалов, причем часть из них находится на пути к коммерциализации. Следует отметить, что такие ФЭП не обладают высокой эффективностью преобразования солнечной энергии и характеризуются низкой стабильностью фотоэлектрических параметров. Но в перспективе ожидается, что решения на основе этих материалов будут создаваться посредством недорогого производственного процесса – печати. Органические материалы и решения на их основе могут использоваться для создания мобильных приборов в потребительской электронике, где не требуется долгого периода работы батареи.

Это не единственные материалы, которые используются в ФЭС. Арсенид галлия используется для аэрокосмических применений, так как солнечные элементы каскадного типа на основе соединений  $A^3B^5$  обладают высокой эффектив-



Таблица 1. Типы тонкопленочных фотоэлектрических систем

Сравнительные характеристики	Кристаллический кремний	Аморфный кремний	CIGS/CIS	CdTe	Органические материалы
Производственная стоимость в настоящее время и ожидаемая в будущем	От 2,40 до 2,70 USD за Вт. Со временем может упасть до 1,75 USD. Хотя некоторые источники сообщают, что, в силу пика развития, стоимость не упадет	В пределах 2,00 USD за Вт и может упасть до 1,25 USD	Подобно кристаллическому кремнию в настоящее время. Может упасть до 2,00 USD за Вт и, возможно, до 1,25 USD за Вт	Возможно, от 2,45 до 2,65 USD за Вт. Может упасть до уровня 2,00 USD и, согласно некоторым источникам, до 1,00 USD за Вт	Решения на их основе еще не доступны, но предполагается в пределах 1,50 USD за Вт. Возможно падение до 0,50 USD или ниже
Эффективность (КПД)	От 15 до 20 %	От 6 до 10 %	19,5 % в лаборатории. От 10 до 14 % при полевых испытаниях	От 9 до 11 % при полевых испытаниях	Полимерные ячейки могут давать 5 %, с маленькими молекулярными ячейками – 7 %. В основном, эффективность еще ниже
Основные преимущества	Отработанная технология, стабильность материала, долговременная стабильность и срок эксплуатации	Коммерческая заинтересованность в таких решениях, сравнительно низкая стоимость, легкость, потенциал для использования с гибкими подложками	Высокая эффективность для тонкопленочных применений, высокая стабильность материала, легкость, потенциал для использования с гибкими подложками	Сравнительно высокая эффективность для тонкопленочных применений, легкость, потенциал для использования с гибкими подложками	Потенциально низкая стоимость по сравнению с другими решениями, легкость, гибкость и возможность простой интеграции с другими решениями, становится возможным расширение ассортимента новых продуктов
Основные недостатки	Относительно высокая стоимость, невозможность использования с гибкими подложками, большая масса солнечных батарей	Низкая эффективность, долгий период деградации свойств материала при воздействии солнечного излучения большой интенсивности	Высокая стоимость для тонкопленочных применений в настоящее время, малый опыт работы с такими материалами по сравнению с аморфным кремнием, потенциальное сокращение ресурса материалов в будущем, токсичность исходных материалов	Высокая стоимость для тонкопленочных применений в настоящее время, не широко поддерживаемая коммерчески идея, контактное сопротивление растет со временем, CdTe являются токсичными соединениями	Технология на ранних стадиях развития и коммерчески недоступна (отсутствует серийное производство), свойства материалов могут быть нестабильными на протяжении длительного периода использования

ностью и низким весом.

Современные кремниевые ТП ФЭП используют аморфный кремний (a-Si), который поглощает до 90 % используемой солнечной энергии, что намного больше, чем кристаллический кремний (c-Si). Это очень широко используемая модификация кремния в ТП ФЭП. Низкие эффективность (КПД) и долговечность солнечных элементов (СЭ) на основе a-Si – основные недостатки его применения в ТП ФЭС. По этим причинам увеличение эффективности СЭ на основе a-Si является главной технической задачей.

Важным шагом в этом направлении было создание так называемых многопереходных структур [10, 11]. Такие структуры состояли из нескольких слоев тонких пленок. За счет этого часть спектра, которая не поглотилась в первом слое, проходила ко второму и т. д. Чередую нужным образом слои материалов, можно добиться поглощения широкой полосы спектра солнечного излучения. В тоже время, многопереходные приборы имеют большую стоимость, чем обычные приборы на основе a-Si, так как его слои требуют согласования.

С использованием нанотехнологий можно добиться повышения эффективности до 20 %, в то время как теоретический предел составляет 93 %. Исследовательские работы, которые ведутся в этом направлении, затрагивают использование квантовых точек, ударную ионизацию, наноструктурные решения, имитирующие многопереходные солнечные элементы для увеличения эффективности. Одним из перспективных направлений создания высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей, на наш взгляд, является использование нанокристаллического кремния, свойства которого зависят от размера нанокристаллов, соотношения кристаллической и аморфной фаз, характеристик границы раздела этих фаз. Введение редкоземельных элементов обеспечивает снижение дефектности структуры, связывание кислорода, уменьшение рекомбинационных центров.

Для получения кремниевых композитов, легированных редкоземельными металлами (РЗМ), необходимо определить каким образом и в каком количестве вводить примесь.

Легирование кремниевой пленки из газовой фазы, которое происходит при химических методах нанесения пленок, сложно реализуется, так как РЗМ практически не образуют газообразных соединений [12, 13]. Поэтому данные композиты получают, в основном, методом магнетронного распыления мозаической мишени Si:РЗМ [12].

Целью данной работы является комплексное исследование свойств тонких пленок кремниевых композитов, легированных иттрием, в зависимости от уровня легирования РЗМ и технологических параметров процесса осаждения.

### Технология изготовления

В данной работе для получения кремниевых пленок использован метод электронно-лучевого испарения мишеней Si:РЗМ [13–16]. Эти сплавы были получены электродуговым методом в атмосфере аргона с предварительным распылением титана в вакуумной камере для снижения содержания кислорода.

В связи с известной низкой растворимостью редкоземельной примеси в монокристаллической матрице было решено подготовить сплавы с разным содержанием РЗМ. Пленки, легированные иттрием, получены из сплавов с разным содержанием редкоземельной примеси – 90:10 ат. % и 67:33 ат. %. Нижний предел содержания иттрия увеличен, так как в первых исследованиях данная примесь не была выявлена методом Оже-электронной спектроскопии в исследуемых образцах.

При этом для исследования свойств пленок кремниевых композитов использовались диэлектрические подложки оксидированного кремния, а для получения гетеропереходов – пластины монокристаллического кремния р-типа проводимости. Омические контакты получены на пленках Ti – Ni, которые осаждались методом электронно-лучевого испарения.

Химический состав исследуемых образцов изучался методом Оже-электронной спектроскопии, который позволяет получать кроме количественного анализа, еще и распределение химических элементов по глубине (рис. 1). Согласно результатам данного анализа исследуемая структура в поперечном сечении имеет следующий вид: контакт (на спектре показан только нижний слой – титан толщиной 30 нм), кремниевая пленка толщиной 5...40 нм и подложка – слой окисленного кремния толщиной 20...30 нм, выращенного термическим методом на c-Si. Пленка, главным образом, состоит из кремния и примеси иттрия, а также содержит незначительное количество побочных примесей (O, C). Что касается концентрации редкоземельной примеси в пленке, то, как и ожидалось, для иттрия наблюдается воспроизводимость химического состава по отношению к первоначальному сплаву.

Пленки, которые осаждались из сплава Si:Y (67:33 ат. %), содержат 30...33 ат. % иттрия

(рис. 1, а, б) с повышением содержания на границе с подложкой, а пленки, полученные из сплава Si:Y (90:10 ат. %), содержат 3...5 ат. % этой примеси (рис. 1, в, г). Распределение кон-

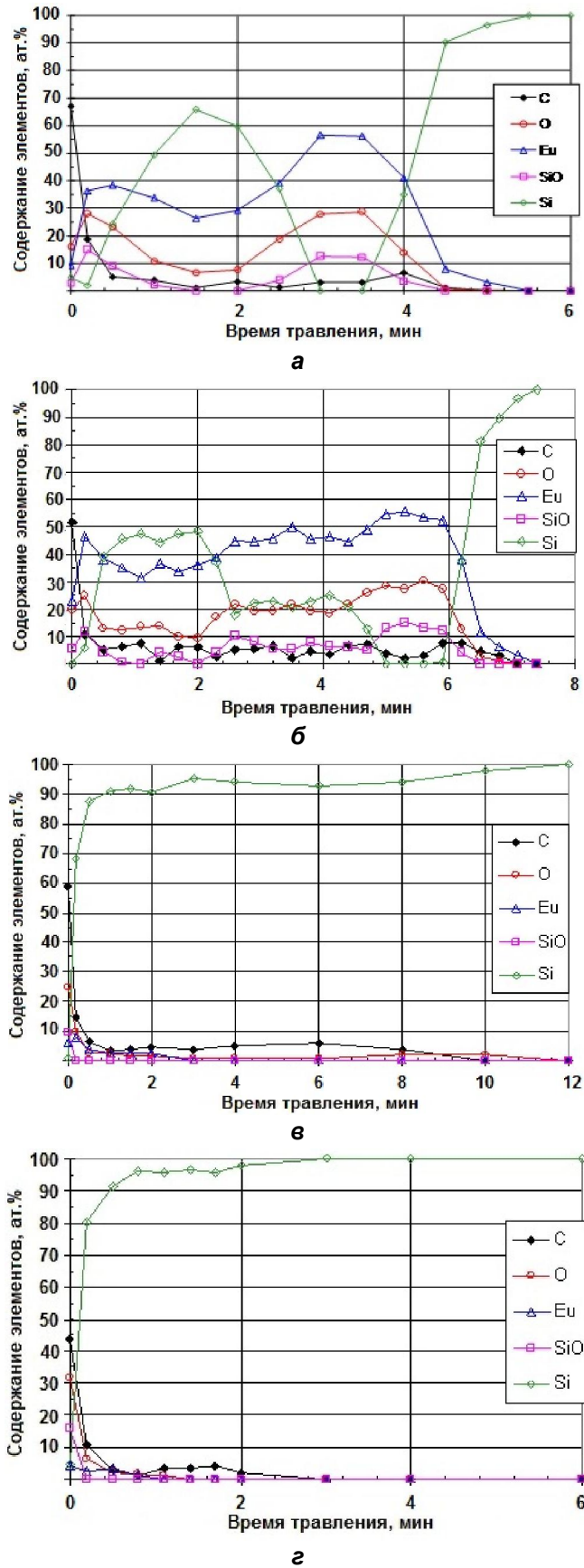


Рис. 1. Оже-спектры образцов, полученных из различных сплавов и при различных температурах осаждения ( $T_{oc}$ ): а – Si:Y – 67:33 ат. %,  $T_{oc}=180^{\circ}C$ ; б – Si:Y – 67:33 ат. %,  $T_{oc}=250^{\circ}C$ ; в – Si:Y – 90:10 ат. %,  $T_{oc}=180^{\circ}C$ ; г – Si:Y – 90:10 ат. %,  $T_{oc}=250^{\circ}C$

центрации редкоземельной примеси по толщине пленки неравномерное и неодинаково при разных ее концентрациях.

В случае высокой концентрации редкоземельной примеси данные Оже-электронной спектроскопии дают возможность предположить образование двухслойной пленки: нижний слой, который формируется непосредственно на подложке, характеризуется повышенным содержанием РЗМ и побочных примесей, а верхний – низкой их концентрацией. Толщина такого переходного слоя находится в пределах от 1 до 10 нм.

Показанные на рис. 1 спектры демонстрируют и геттерные свойства редкоземельных примесей, а именно: четко прослеживается идентичность концентрационного профиля для иттрия и кислорода, что может свидетельствовать о связи РЗМ–кислород. Таким образом, иттрий, связывая не контролируемые примеси, «очищает» пленку от электрически активных дефектов, что создает условия для улучшения электрических и оптических свойств пленок кремниевых композитов.

Исследование вольт-амперных характеристик (рис. 2) показало наличие существенного влияния температуры осаждения и содержания иттрия на свойства пленок кремниевого композита Si:Y.

Данная редкоземельная примесь приводит к возрастанию проводимости, причем это влияние тем заметнее, чем большее его содержание в исходном сплаве. Так, введение 10 ат. % иттрия приводит к возрастанию электропроводности кремниевой пленки на порядок, тогда как уровень 33 ат. % вызывает повышение этой величины на два порядка. Величина изменения электропроводности материала определяется и температурой осаждения. При образовании нанокристаллитов происходит разделение электронных зон на подзоны и отдельные электронные уровни, а переход от отдельных атомов и молекул сопровождается расширением отдельных уровней до зон, хотя эти переходы не носят резко выраженного характера.

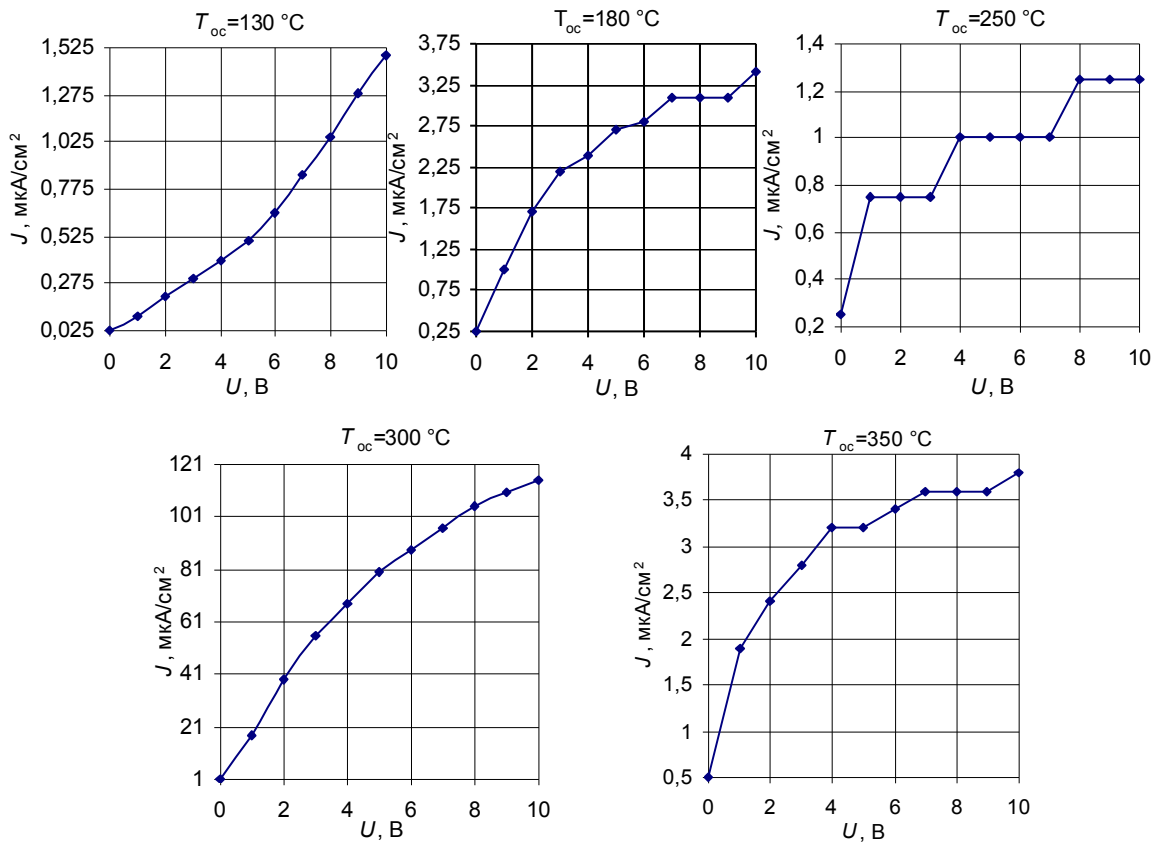
Появление дискретных электронных уровней связано с ограничением длины свободного пробега электронов и характеризует эффекты квантового ограничения в нанокристаллитах. Это приводит к снижению электропроводности с уменьшением размера нанокристаллита и появлению кулоновского барьера для одноэлектронного перехода между уровнями, разделенными на энергию, которая больше температурного потенциала  $kT$ . Этот барьер определяет-

ся электростатической энергией  $e^2/(2 \cdot C)$ , где  $C$  – емкость нанокристаллической фазы, зависящая от ее размера. Вольт-амперные характеристики проводимости такой системы с размерами несколько нанометров обладают ступенчатыми зависимостями, причем количество ступеней возрастает с уменьшением размера нанокристаллита. На ступенчатый характер проводимости, как видно из впервые полученных зависимостей для кремниевых композитов (рис. 2), влияет и содержание иттрия, который формирует межфазную структуру на поверхности нанокристаллита и на интерфейсе с аморфной кремниевой матрицей. Причем, с повышением температуры осаждения размер нанокристаллической фазы возрастает.

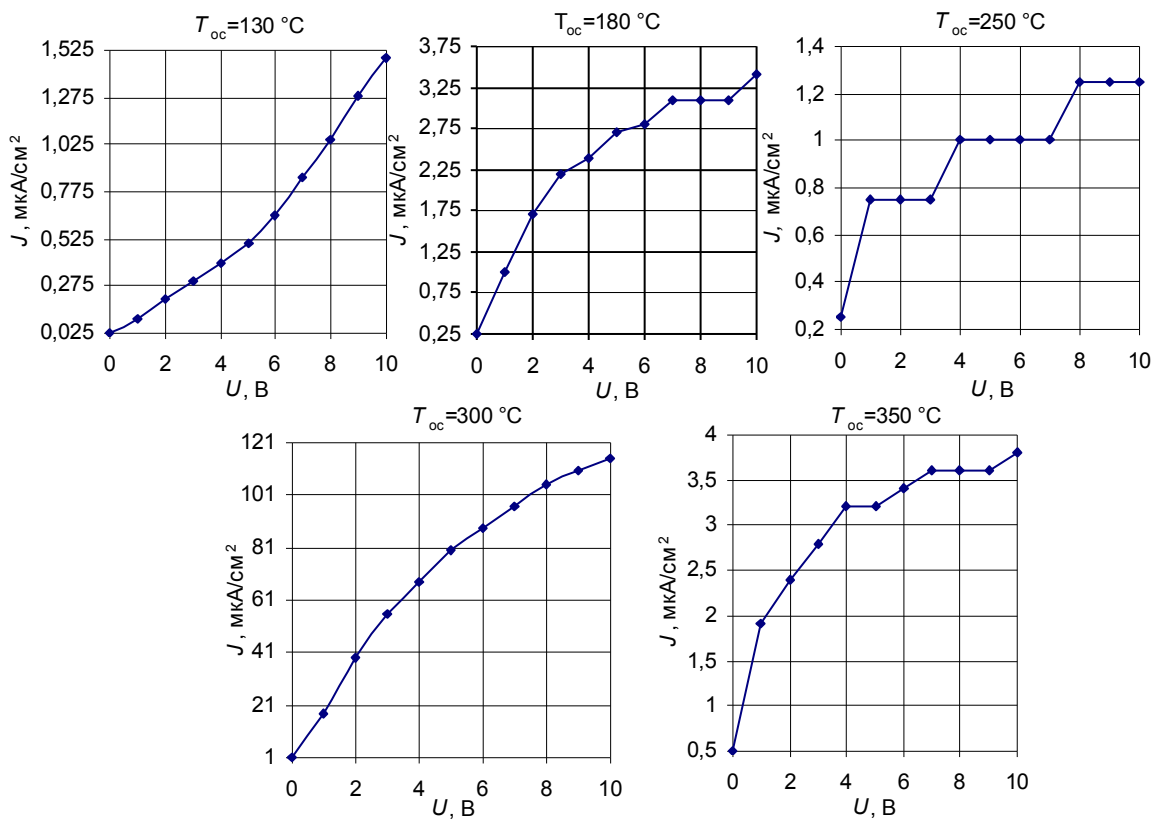
Существует несколько возможных объяснений такому влиянию примесей РЗМ на электрические свойства пленок. Во-первых, редкоземельные элементы – известные геттеры неконтролируемых примесей и структурных дефектов, что улучшает условия транспорта носителей заряда. Во-вторых, имеет место насыщение оборванных связей Si, что также приводит к возрастанию проводимости. Согласно анализу химического состава материала (рис. 1), можно сделать вывод о присутствии обеих указанных причин. Ослабление же проводящих свойств нанокристаллитов связывается с рассеянием электронов проводимости на его поверхности. При объединении нанокристаллитов в наноструктуры сохраняются факторы уменьшения числа носителей заряда и рассеяния на межфазных границах. Однако появляются и новые факторы, которые связаны с возможными туннельными электронными переходами между соседними нанокристаллитами, наличием диэлектрических зарядов и т. д.

При исследовании оптических характеристик (рис. 3) установлено влияние температуры осаждения на коэффициент оптической прозрачности пленок ( $K$ ).

На приведенных зависимостях просматривается общая тенденция к смещению максимума зависимости и края оптической прозрачности в сторону коротких волн при повышении температуры осаждения. Данное поведение характеристик можно объяснить, опираясь на связь коэффициентов прозрачности и поглощения. При повышении температуры край поглощения смещается в длинноволновую область, что обусловлено образованием нанокристаллической фазы и, соответственно, сужением запрещенной зоны.



а



б

Рис. 2. Вольт-амперные характеристики исследуемых композитных пленок, легированных иттрием: а – Si:Y – 67:33 ат. %; б – Si:Y – 90:10 ат. %

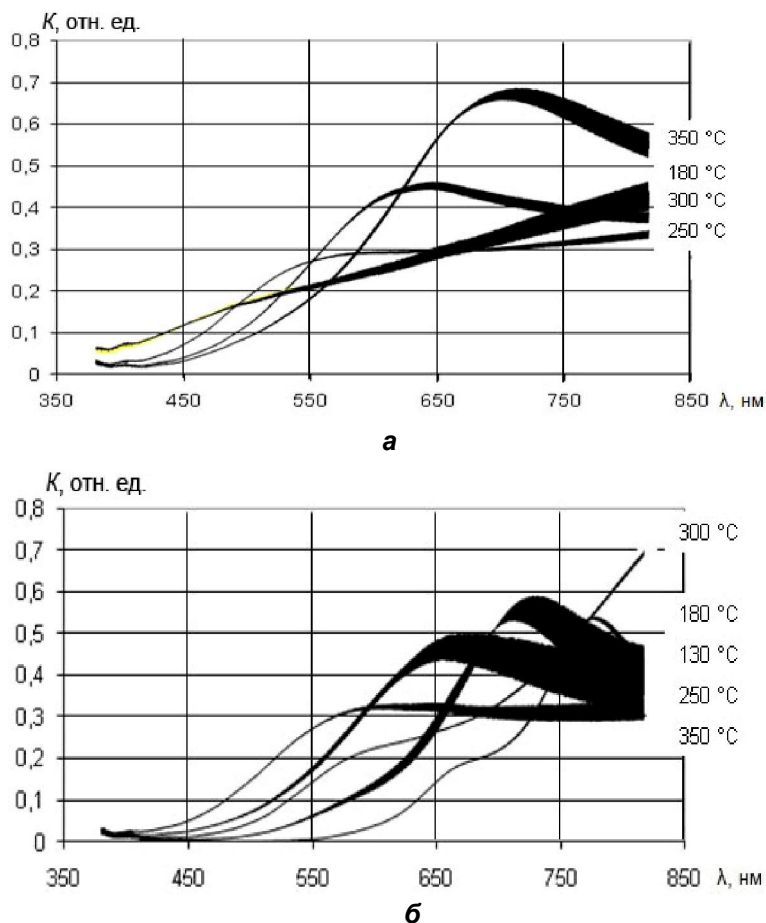


Рис. 3. Спектры оптической прозрачности композитных пленок Si:Y при разных температурах их осаждения: а – Si:Y – 90:10 ат. %; б – Si:Y – 67:33 ат. %

В табл. 2 приведены расчетные фотоэлектрические параметры композитных пленок Si:Y, которые определяются структурой пленок, на-

личием нанокристаллической фазы и содержанием иттрия, формирующего межфазную границу.

Таблица 2. Фотоэлектрические параметры композитных пленок Si:Y

Номер образца	Состав пленки	Температура осаждения, °С	Коэффициент fotocувствительности к видимому излучению, мА/лм	Коэффициент fotocувствительности к УФ-излучению, мА/Вт
1-1	a-Si:Y(33%)	130	0,75	0,15
1-2		180	0,60	0,17
1-3		250	2,80	0,15
1-4		300	3,20	0,32
1-5		350	6,10	1,20
2-1	a-Si:Y(10%)	130	1,50	1,74
2-2		180	0,60	0,92
2-3		250	1,70	0,30
2-4		300	4,70	4,80
2-5		350	0,79	0,98

## Выводы

1. Установлено, что легирование кремниевых композитов иттрием позволяет получить пленки с высокой фоточувствительностью как в видимой (5...6 мА/лм), так и в ультрафиолетовой (2...5 мА/Вт) области спектра.

2. Повышение температуры осаждения приводит к формированию пленок с различной структурой от аморфной до нанокристаллической, что подтверждается наблюдаемыми ступенчатыми характеристиками проводимости и сдвигом края собственного оптического поглощения. Причем имеются определенные значения температур осаждения, при которых наблюдается максимальная фоточувствительность и чувствительность к ультрафиолетовому облучению.

## Литература

1. *Gasman L.* Thin Film and Organic PV: New Application for Solar Energy // *NanoMarkets*. – 2006. – № 3. – P.1–60.
2. *Catchpole K.R., McCann M.J., Weber K.J., Blakers A.W.* A review of thin-film crystalline silicon for solar cell application. Part 2: Foreign substrates // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. – 2001. – № 68. – P.173–215.
3. *Bergmann R.B.* Crystalline Si films on foreign substrates for electronic applications Recent Research Developments in Crystal Growth Research // *NanoMarkets*. – 1999. – № 1. – P.1–4.
4. *Yamanoto K., Yoshimi M., Tawada Y., Okamoto V., Nakajima A.* Cost effective and high performance thin film Si solar cell towards the 21st century // *Proceeding of Technical Digest of the International PVSEC-11 (12–15 September 1999)*. – Sapporo, Japan, 1999. – P. 25–35.
5. *Andra G., Bergmann J., Falk F., Ose F., Sinh N.D.* Properties of laser crystallised silicon thin films for solar cells // *Proceeding of 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion (6–10 July, 1998)*. – Vienna, Austria, 1998. – P. 1–9.
6. *Hofmann M., Glunz S., Preu R., Willeke G.* 21%-efficient silicon solar cells using amorphous silicon rear side passivation // *Proceeding of 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference (4–8 September, 2006)*. – Dresden, Germany, 2006. – P. 609–612.
7. *Scherff M.L.D., Ma Y., Dungen W., Mueller T., Fahrner W.R.* Increased efficiencies a-Si:H(n)/cz-Si(p) heterojunction solar cells due to gradient doping by thermal donors // *Proceeding of 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference (4–8 September, 2006)*. – Dresden, Germany, 2006. – P. 1177–1180.
8. *Stangl R., Bivour M., Conrad E., Didschuns I., Korte L., Lips K., Schmidt M., Recash K.* A novel high efficiency buried grid rear contact amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cell concept // *Proceeding of 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (3–7 September, 2007)*. – Milan, Italy, 2007. – P. 871–874.
9. *Franklin E., Blakers A., Everett V., Weber K.* A 20% efficient SLIVER solar cell // *Proceeding of 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (3–7 September 2007)*. – Milan, Italy, 2007. – P. 905–908.
10. *Lu M., Bowden S., Das U., Birkmire R.* a-Si/c-Si heterojunction for interdigitated back contact solar cell // *Proceeding of 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (3–7 September, 2007)*. – Milan, Italy, 2007. – P. 924–927.
11. *Korte L., Conrad E., Angermann H., Stangl R., Schmidt M.* Overview on a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells – physics and technology // *Proceeding of 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (3–7 September, 2007)*. – Milan, Italy, 2007. – P. 862–865.
12. *Мездрогина М.М., Трапезникова И.Н., Терюков Е.И.* Природа примесных центров редкоземельных металлов и процессы самоорганизации в  $\alpha$ -Si(H) // *Физика и техника полупроводников*. – 2002. – Т. 36, № 11. – С. 1337 – 1344.
13. *Коваль В.М., Шмирева О.М.* Дослідження домішкових центрів Eu в кремнієвих плівках // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2007. – № 5. – С. 36–40.
14. *Shmyryeva A.N., Semikina T.V.* Optical Properties of amorphous silicon - yttrium films // *Material Research Society*. – 2005. – Vol. 862. – P. A18.7.1–A18.7.6.
15. *Коваль В.М., Шмирева О.М.* Нанокристалічний кремній з керованими напівпровідниковими властивостями // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2005. – № 4. – С. 14–28.
16. *Коваль В.М., Шмирева А.Н.* Гетероструктурные преобразователи на основе нанокристаллических кремниевых пленок nc-Si:Eu // *Материалы конференции «Тонкие пленки в оптике и наноэлектронике»*. – Харьков, 2006. – Т.2. – С. 184–188.

## Теория сигналов и систем

УДК 621.37:621.391

В.В. Палагин, канд. техн. наук

### Полиномиальные алгоритмы обнаружения сигналов на фоне коррелированных негауссовских помех

Разработан метод проверки статистических гипотез для синтеза и анализа нелинейных алгоритмов обнаружения постоянных сигналов на фоне негауссовских коррелированных помех на основе использования полиномиальных решающих правил и моментно-кумулянтного описания случайных величин. Показано, что использование совместных моментов различных порядков дает возможность учитывать корреляционные свойства случайных величин и их негауссовское распределение. Полученные результаты показывают, что нелинейная обработка выборочных значений и учет тонкой структуры негауссовских помех с использованием коэффициентов асимметрии и эксцесса позволяет повысить эффективность решающих правил.

The development of method testing statistical hypotheses for a synthesis and analysis of nonlinear algorithms of signals detection on a background Non-Gaussian noise is considered. The new method based of the use of polynomial decision rules and moment-cumulant description of random variable. It is show that the use of joint moments of different orders is given possibility to take into account cross-correlation properties of random variable and their Non-Gaussian distributing. The got results show that nonlinear processing of selective values and account of structure of Non-Gaussian noise as coefficients of asymmetry and excess allows increasing of efficiency of decision rules.

**Ключевые слова:** стохастические полиномы, моментные критерии качества, коррелированные негауссовские помехи.

#### Введение

Во многих радиотехнических, телекоммуникационных и информационных системах актуальными являются задачи построения оптимальных алгоритмов статистической обработки сигналов при наличии помех. Среди множества таких задач особое место занимают задачи по обнаружению, различению и распознаванию сигналов на

фоне помех. Данному направлению посвящено достаточно много фундаментальных работ по проверке статистических гипотез [1–3], в которых приведены основные результаты исследований без наложения ограничений на плотности распределения рассматриваемых случайных величин. Однако на практике, в виду нормализации многих природных процессов и удобства использования математической модели, наиболее широко используются гауссовские модели случайных величин, что не всегда адекватно отображает реальные физические процессы [4].

Интерес к обработке негауссовских случайных процессов постоянно растет, о чем свидетельствуют публикации [5, 6]. Для решения задач различения и обнаружения сигналов на фоне негауссовских помех активно применяются такие подходы, как марковские процессы, полигауссовские модели, в основе которых лежит использование плотностей распределения случайных величин и вероятностных критериев качества (критерий Байеса, Неймана-Пирсона и др.).

*Определение 1.* Критерии качества выбора решающих статистик, основанные на использовании плотностей распределения для описания случайных величин и вероятностях ошибок решающих правил, будем называть вероятностными критериями качества.

В теории вероятностей и математической статистике случайные величины количественно можно охарактеризовать не только с помощью установления вероятности осуществления того или иного события, но и с помощью более грубых количественных мер числовых характеристик случайных величин, таких как математическое ожидание, дисперсия и т. д.

*Определение 2.* Критерии качества выбора решающих статистик, основанные на использовании моментов для описания случайных величин, будем называть моментными критериями качества.

Новым подходом к разрешению проблем обработки негауссовских сигналов и помех является использование моментных критериев качества, которые основываются на моментно-кумулянтном описании случайных величин [7] и стохастических полиномах конечного порядка



[8–10] в виде решающих правил (РП), что позволяет, с одной стороны, описывать негауссовский характер случайных величин, а с другой – приводит к упрощению конечных алгоритмов обработки сигналов с лучшими качественными показателями [10–12].

В отмеченных работах по использованию моментных критериев качества для проверки статистических гипотез получены результаты, которые относятся к обработке статистически независимых выборочных значений. В тоже время существует ряд задач с ограниченным интервалом наблюдений, где статистическими связями выборочных значений случайных величин пренебречь нельзя [13]. В связи с этим представляет интерес исследование таких статистических связей и их влияния на качественные показатели обнаружения сигналов на фоне негауссовских помех.

Таким образом, актуальным является разработка метода для проверки статистических гипотез при использовании статистически зависимых негауссовских случайных величин, получение аналитических выражений решающих правил и исследование их эффективности.

### 1. Разработка и использование моментного критерия качества проверки статистических гипотез при статистически зависимых выборочных значениях

Пусть для случайной величины  $\xi$  имеется зависящая выборка  $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  объемом  $n$ , которая произведена при осуществлении гипотезы  $H_1$ , когда в моменты времени  $1, 2, \dots, n$  наблюдается аддитивная смесь полезного сигнала  $a$  и помехи  $\eta$ . Тогда выборочные значения  $x_v$ ,  $v = \overline{1, n}$ ,

описываются начальными моментами  $m_i^{(v)}$  порядка  $i$  в момент времени  $v$ , а смешанные моменты двух выборочных значений  $x_v$  и  $x_k$  – совместными моментами  $m_{i,j}^{(v,k)}$  размерностью  $(i, j)$

в моменты времени  $v$  и  $k$ . При осуществлении гипотезы  $H_0$ , когда наблюдается только одна помеха  $\eta$ , выборочные значения  $x_v$  описываются начальными моментами  $u_i^{(v)}$  порядка  $i$ , а смешанные моменты двух случайных величин  $x_v$  и  $x_k$  описываются совместными моментами  $u_{i,j}^{(v,k)}$  размерностью  $(i, j)$ . Необходимо синтезировать РП, с помощью которого по выборке  $\mathbf{X}$  можно определить, какая из гипотез осуществилась.

В работе [14] разработан метод обработки статистически зависимых случайных величин,

где отношение правдоподобия можно представить в виде стохастического полинома конечной степени  $s$ :

$$\Lambda_{sn}(X) = \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^s h_{i,v} x_v^i + h_0 \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix}, \quad (1)$$

где  $h_{i,v}$ ,  $h_0$  – оптимальные коэффициенты, которые должны минимизировать один из хорошо известных вероятностных критериев качества, в частности критерий суммы вероятностей ошибок первого ( $\alpha$ ) и второго рода ( $\beta$ ) РП, и определяются из минимума моментного критерия качества верхней границы вероятностей ошибок или кратко  $Ku(E, G, \rho)_s$ :

$$Ku(E, G, \rho)_s = \frac{\sum_{v=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s h_{i,v} h_{j,k} F_{i,j}^{(v,k)}}{\left( \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^s h_{i,v} \left( m_i^{(v)} - u_i^{(v)} \right) \right)^2}, \quad (2)$$

который, согласно теореме Чебышева:

$$\alpha = P[\Lambda_{sn}(x) \geq 0 / H_0] \leq \frac{G_0}{(E_0 + h_0)^2},$$

$$\beta = P[\Lambda_{sn}(x) < 0 / H_1] \leq \frac{G_1}{(E_1 + h_0)^2};$$

представляет собой сумму верхних границ вероятностей ошибок первого и второго рода РП (1) и зависит от математического ожидания  $E_r$  и дисперсии  $G_r$  РП при гипотезе  $H_r$  ( $r = 0, 1$ ):

$$E_1 = \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^s h_{i,v} u_i^{(v)}; \quad E_0 = \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^s h_{i,v} m_i^{(v)};$$

$$G_r = \sum_{v=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s h_{i,v} h_{j,k} F_{i,j}^{(v,k)}(H_r), \quad r = 0, 1.$$

Отличительной особенностью полученного моментного критерия (2) является то, что используются не только начальные моменты  $u_i^{(v)}$  и  $m_i^{(v)}$ , но и совместные моменты  $u_{i,j}^{(v,k)}$  и  $m_{i,j}^{(v,k)}$ , позволяющие учитывать не только такие параметры, как дисперсию ( $\chi_2$ ), асимметрию ( $\gamma_3$ ), эксцесс ( $\gamma_4$ ) негауссовской помехи, но и корреляционные свойства выборочных значений в виде заданной функции корреляции  $\rho^{(v,k)}$  между  $v, k$  выборочными значениями.

В выражении (2) приведен параметр  $F_{i,j}^{(v,k)}$ , имеющий следующий вид:

$$F_{i,j}^{(v,k)} = F_{i,j}^{(v,k)}(H_0) + F_{i,j}^{(v,k)}(H_1)$$

и который характеризует взаимосвязь между начальными и совместными моментами при гипотезе и альтернативе

$$F_{i,j}^{(v,k)}(H_0) = u_{i,j}^{(v,k)} - u_i^{(v)} u_j^{(k)};$$

$$F_{i,j}^{(v,k)}(H_1) = m_{i,j}^{(v,k)} - m_i^{(v)} m_j^{(k)}.$$

В работе [14] показано, что оптимальные коэффициенты, минимизирующие верхние границы суммы вероятностей ошибок первого и второго рода (2) определяются из решения системы уравнений

$$\sum_{j=1}^s h_{j,v} F_{i,j}^{(v,k)} = m_i^{(v)} - u_i^{(v)}, \quad v, k = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, s}, \quad (3)$$

а значение коэффициента  $h_0$  определяется как среднее значение между математическими ожиданиями РП (1) при гипотезе и альтернативе:

$$h_0 = -\frac{1}{2}(E_1 + E_0),$$

или

$$h_0 = -\frac{1}{2} \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^s h_{i,v} \left( m_i^{(v)} + u_i^{(v)} \right). \quad (4)$$

Необходимо отметить, что система алгебраических уравнений (3) решается при использовании численных методов, т. к. параметр  $F_{(i,j)}^{(v,k)}(H_r)$  при гипотезе  $H_r$  ( $r = 0, 1$ ) представляет собой корреляционные матрицы, описывающие взаимосвязь выборочных значений в виде заданной функции корреляции  $\rho^{(v,k)}$ .

Например, при построении линейного РП (1) при степени полинома  $s = 1$  коэффициент  $h_{1,v}$  по методу Крамера будет выражаться через определитель системы уравнений (3):

$$\Delta_1 = \left| F_{1,1}^{(v,k)} \right| = \begin{vmatrix} \rho^{(1,1)}, \rho^{(1,2)} & & \rho^{(1,n)} \\ \rho^{(2,1)}, \rho^{(2,2)} & \dots & \rho^{(2,n)} \\ \dots & & \dots \\ \rho^{(n,1)}, \rho^{(n,2)} & \dots & \rho^{(n,n)} \end{vmatrix}, \quad (5)$$

а при построении нелинейного РП (1) при степени полинома  $s = 2$  выражение (3) пред-

ставляет собой систему  $2n$  уравнений с  $2n$  неизвестными, где определитель примет вид

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} F_{1,1}^{(1,1)} & \dots & F_{1,1}^{(1,n)} & F_{1,2}^{(1,1)} & \dots & F_{1,2}^{(1,n)} \\ \dots & & \dots & \dots & & \dots \\ F_{1,1}^{(n,1)} & \dots & F_{1,1}^{(n,n)} & F_{1,2}^{(n,1)} & \dots & F_{1,2}^{(n,n)} \\ \dots & & \dots & \dots & & \dots \\ F_{2,1}^{(1,1)} & \dots & F_{2,1}^{(1,n)} & F_{2,2}^{(1,1)} & \dots & F_{2,2}^{(1,n)} \\ \dots & & \dots & \dots & & \dots \\ F_{2,1}^{(n,1)} & \dots & F_{2,1}^{(n,n)} & F_{2,2}^{(n,1)} & \dots & F_{2,2}^{(n,n)} \end{vmatrix}, \quad (6)$$

и находится по формуле Шура, используя понятие блочных матриц [15].

Легко показать, что при перемножении левой и правой части выражения (3) на найденные оптимальные коэффициенты  $h_{i,v}$  получим минимальное значение моментного критерия качества:

$$Ku(E, G, \rho)_s = J_s^{-1},$$

где  $J_s$  – количество извлекаемой информации из выборочных значений о различии гипотез  $H_1$  и  $H_0$  с помощью РП (1), равное

$$J_s = \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^s h_{i,v} \left( m_i^{(v)} - u_i^{(v)} \right) = \sum_{v=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s h_{i,v} h_{j,k} F_{i,j}^{(v,k)}. \quad (7)$$

Таким образом, для зависимой выборки РП проверки статистических гипотез представлено в виде стохастического полинома (1), где коэффициент  $h_0$  определяется согласно формуле (4), а коэффициенты  $h_{i,v}$  находятся из решения системы алгебраических уравнений (3). При этом минимальное значение критерия качества, а соответственно и верхние границы вероятностей ошибок первого и второго рода определяются согласно (7). Полученные выражения позволяют синтезировать конкретные РП для обнаружения различных сигналов при негауссовских помехах для зависимых выборочных значений.

Исследование негауссовских моделей сигналов и помех представляет собой достаточно обширную задачу, так как приходится рассматривать определенную последовательность начальных моментов и кумулянтов, которые описывают степень отклонения случайных величин от нормального закона распределения. При этом возникают сложные вопросы, связанные с существованием области допустимых значений кумулянтов и наложении ограничений при их взаимном использовании [7]. С другой стороны показано, что кумулянты различных порядков, как коэффициенты разложения характеристиче-

ской функции, могут быть отнесены к определенным классам, которые характеризуют соответствующую плотность вероятностей. Такая классификация негауссовских случайных величин получила название их перфорации, где выделены асимметричные, эксцессные и др. статистически независимые случайные величины различных типов и видов [8].

В данной работе предлагается дальнейшее развитие классификации негауссовских статистически зависимых случайных величин, что позволяет существенно упростить построение РП и исследование их свойств. Приведем примеры классификации случайных величин, которые будут использоваться для построения РП при степени полинома  $s = 1, 2$ .

**Определение 3.** Гауссовскими статистически зависимыми случайными величинами называются такие, которые описываются начальными моментами  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha_2 = \chi_2$ ,  $\alpha_3 = 0$ ,  $\alpha_4 = 3\chi_2^2$ ,  $\alpha_5 = 0$ ,  $\alpha_6 = 15\chi_2^3$ , ..., и совместными моментами  $u_{i,j}^{(v,k)}$ , выраженными через совместные кумулянты  $\chi_{i,j}$ :

$$u_{1,1}^{(v,k)} = \chi_{1,1}^{(v,k)} = \chi_2 \cdot \rho^{(v,k)};$$

$$u_{1,2}^{(v,k)} = \chi_{1,2} = 0;$$

$$u_{2,2}^{(v,k)} = \chi_2^2 \left[ 1 + 2 \left( \rho^{(v,k)} \right)^2 \right],$$

где  $\chi_2$  – дисперсия случайной величины;  $\rho^{(v,k)}$  – нормированная корреляционная функция заданного вида между  $v$ -м и  $k$ -м выборочным значением.

**Определение 4.** Асимметричными статистически зависимыми случайными величинами 1-го типа 1-го вида называются такие, которые описываются начальными моментами  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha_2 = \chi_2$ ,  $\alpha_3 = \chi_3$ ,  $\alpha_4 = 3\chi_2^2$ ,  $\alpha_5 = 10\chi_2\chi_3$ ,  $\alpha_6 = 10\chi_3^2 + 15\chi_2^3$ , ..., и совместными моментами  $u_{i,j}^{(v,k)}$ , выраженными через совместные кумулянты  $\chi_{i,j}$ :

$$u_{1,1}^{(v,k)} = \chi_{1,1}^{(v,k)} = \chi_2 \cdot \rho^{(v,k)};$$

$$u_{1,2}^{(v,k)} = \chi_{1,2}^{(v,k)} = \gamma_3 \chi_2^{3/2} \left( \rho^{(v,k)} \right)^{3/2};$$

$$u_{2,2}^{(v,k)} = \chi_2^2 \left[ 1 + 2 \left( \rho^{(v,k)} \right)^2 \right].$$

**Определение 5.** Эксцессными статистически зависимыми случайными величинами 1-го типа 1-го вида называются такие, которые, описываются начальными моментами  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha_2 = \chi_2$ ,  $\alpha_3 = 0$ ,  $\alpha_4 = \chi_4 + 3\chi_2^2$ ,  $\alpha_5 = 0$ ,  $\alpha_6 = 15\chi_2\chi_4 + 15\chi_2^3$ , ..., и совместными моментами  $u_{i,j}^{(v,k)}$ , выраженными через совместные кумулянты  $\chi_{i,j}$ :

$$u_{1,1}^{(v,k)} = \chi_{1,1}^{(v,k)} = \chi_2 \cdot \rho^{(v,k)}; \quad u_{1,2}^{(v,k)} = \chi_{1,2} = 0;$$

$$u_{2,2}^{(v,k)} = \chi_2^2 \left[ \gamma_4 \left( \rho^{(v,k)} \right)^2 + 1 + 2 \left( \rho^{(v,k)} \right)^2 \right].$$

В данной работе в качестве примера приведены результаты построения РП обнаружения постоянных сигналов, имеющих место в системах передачи дискретных сигналов, в системах последетекторной обработки и т. д., на фоне асимметричных и эксцессных коррелированных негауссовских помех.

## 2. Синтез и анализ полиномиальных алгоритмов обработки сигналов

Пусть при осуществлении гипотезы  $H_1$  наблюдается случайная величина  $\xi$ , имеющая вид

$$\xi = a + \eta,$$

где  $a$  – наблюдаемый постоянный сигнал;  $\eta$  – негауссовская случайная величина с нулевым математическим ожиданием и кумулянтами  $\chi_k$ ,  $k = \overline{1, n}$ ; а при осуществлении гипотезы  $H_0$  наблюдается случайная величина вида  $\xi = \eta$ .

Легко показать, что РП общего вида (1) при степени полинома  $s = 1$ , используя формулы (3) и (4), примет вид

$$\begin{array}{c} H_1 \\ \sum_{v=1}^n A_v \left( x_v - \frac{a}{2} \right) > 0, \\ H_0 \end{array} \quad (8)$$

где  $A_v$  – определитель, полученный из  $\Delta_1$  заменой  $v$ -го столбца столбцом, состоящего из единиц, а  $\Delta_1$  имеет вид (5).

При этом количество извлекаемой информации (7) о различии гипотез для линейного РП (8) примет вид

$$J_1 = \frac{a^2}{\Delta_1} \sum_{v=1}^n A_v, \quad (9)$$

а значение критерия качества  $Ku(E, G, \rho)_1$  будет иметь вид, обратный выражению (9).

Рассматривая определитель  $\Delta_1$  (5) видно, что его элементы  $\rho^{(v,k)}$  характеризуют статистические связи между  $v$ -м и  $k$ -м выборочными значениями. Так как случайные величины  $x_v, x_k$  характеризуются одинаковыми среднеквадратичными отклонениями  $\sigma_v = \sigma_k = \sigma$ , то  $\Delta_1 = \sigma^{2n} \Delta_1^*$ ,  $\Delta_v = \sigma^{2(n-1)} \Delta_v^*$ , где  $\Delta_1^*$  – определитель с элементами  $\rho^{(v,k)}$ , а  $\Delta_v^*$  – определитель, полученный из  $\Delta_1^*$  заменой  $v$ -го столбца столбцом из единиц.

Тогда выражение (9) имеет следующий вид:

$$J_{1,n} = \frac{a^2}{\sigma^2 \Delta_1^*} \sum_{v=1}^n \Delta_v^* = \frac{q}{\Delta_1^*} \sum_{v=1}^n \Delta_v^*,$$

где  $q = \frac{a^2}{\sigma^2}$  – отношение сигнал/помеха, а значение критерия качества равно

$$Ku(E, G, \rho)_1 = \frac{\Delta_1^*}{q \sum_{v=1}^n \Delta_v^*}. \quad (10)$$

Из формулы (10) видно, что чем большее отношение сигнал/помеха  $q$ , тем меньшее значение критерия качества  $Ku(T, G, \rho)_1$ , и следовательно, меньше верхние границы вероятностей ошибок первого и второго рода линейного РП (8).

Если выборочные значения независимые, т. е.  $\rho^{(v,k)} = 0$  при  $v \neq k$  и  $\rho^{(v,k)} = 1$  при  $v = k$ , тогда  $\Delta_1^* = 1$ ,  $\sum_{v=1}^n \Delta_v^* = n$  и значение критерия качества  $Ku(E, G, \rho)_1$  (10) примет хорошо известное значение как при независимых выборочных значениях [11, 12]:

$$Ku(E, G, \rho)_1 = \frac{1}{nq},$$

а линейное РП (8) преобразуется к виду

$$\frac{1}{n} \sum_{v=1}^n x_v - \frac{a}{2} \begin{matrix} H_1 \\ > \\ < \\ H_0 \end{matrix} 0, \quad (11)$$

где происходит сравнение усредненной суммы выборочных значений с половинным значением математического ожидания принимаемого сигнала.

Отметим, что РП вида (8) и (11) совпадают с результатами, полученными из отношения

правдоподобия для гауссовских моделей помех в предположении статистически зависимых и независимых выборочных значений соответственно [1, 2], что подчеркивает тесную связь предложенного моментного критерия качества с вероятностным критерием идеального наблюдателя.

Полученное линейное РП вида (8) не учитывает негауссовское распределение помех в виде моментов выше третьего порядка. Поэтому представляет интерес увеличения степени стохастического полинома до  $s = 2$ . В этом случае РП будет нелинейным и в общем случае примет вид

$$\sum_{v=1}^n h_{1,v} x_v + \sum_{v=1}^n h_{2,v} x_v^2 - h_0 \begin{matrix} H_1 \\ > \\ < \\ H_0 \end{matrix} 0, \quad (12)$$

где система уравнений для нахождения неизвестных коэффициентов, согласно системе уравнений (3), запишется как

$$\begin{cases} h_{1,v} F_{1,1}^{(v,k)} + h_{2,v} F_{1,2}^{(v,k)} = a, \\ h_{1,v} F_{2,1}^{(v,k)} + h_{2,v} F_{2,2}^{(v,k)} = a^2, v, k = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (13)$$

При решении системы уравнений (13) получены неизвестные коэффициенты РП (12), имеющие вид

$$h_{1,v} = \frac{aA_v}{\Delta_2}, v = \overline{1, n}; h_{2,v} = \frac{aB_v}{\Delta_2}, v = \overline{n+1, 2n},$$

где  $A_v$  – определитель, полученный из определителя  $\Delta_2$  (6) заменой  $v$ -го столбца ( $v = \overline{1, n}$ ) столбцом с элементами  $(1, 1, \dots, 1, a, a, \dots, a)$ , а определитель  $B_v$  подобен нахождению определителю  $A_v$ , только  $v = \overline{n+1, 2n}$ .

Решение поставленной задачи разделяется на составляющие, которые соответствуют приведенным выше классам статистически зависимых случайных величин. Приведем конечные результаты, характеризующие эффективность нелинейного РП вида (12) по сравнению с известными результатами в виде линейного РП вида (8) для асимметричных и эксцесных коррелированных негауссовских помех.

На рис. 1 приведены зависимости отношения количества извлекаемой информации из выборочных значений для линейного  $J_{1,n}$  и нелинейного  $J_{2,n}$  РП от коэффициентов асимметрии и эксцесса при различных отношениях сигнал/помеха  $q$  и параметре  $A$ , характеризую-

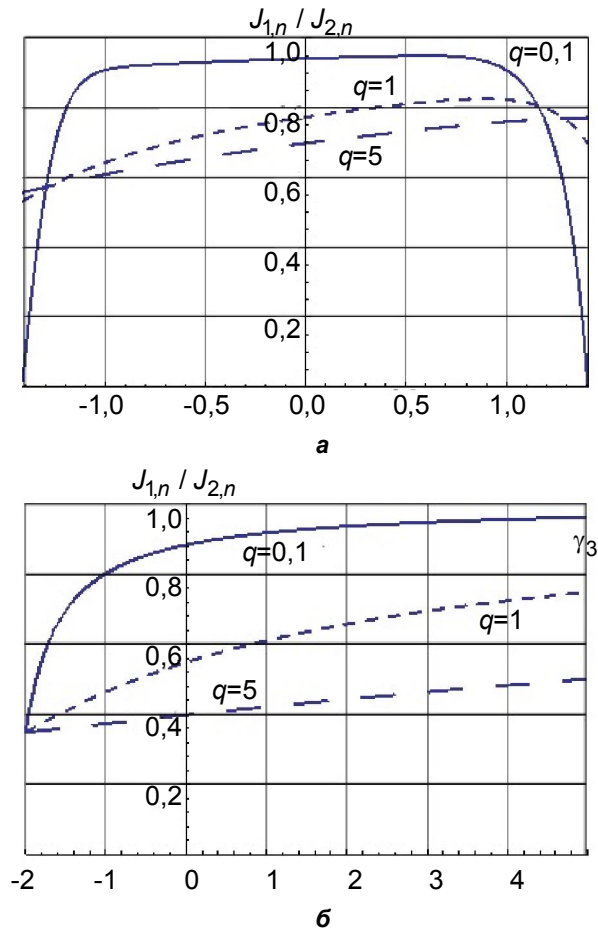


Рис. 1. Зависимость отношения количества извлекаемой информации  $J_{1,n}$  к  $J_{2,n}$  от коэффициента асимметрии  $\gamma_3$  (а) и коэффициента эксцесса  $\gamma_4$  (б) при различных параметрах  $q$  и  $A = 1$

щего степень статистической связи для экспоненциальной корреляционной функции вида

$$\rho(\tau) = \sigma^2 e^{-A|\tau|}.$$

Из графиков следует, что отношение  $J_{1,n}$  к  $J_{2,n}$  меньше единицы. Это показывает, что для нелинейного РП при  $s = 2$  вида (12) значение количества извлекаемой информации  $J_{2,n}$  больше чем значение  $J_{1,n}$  при  $s = 1$  для линейного РП (8), что соответствует увеличению эффективности обнаружения сигналов в виде уменьшения верхних границ суммы вероятностей ошибок первого и второго рода нелинейного РП по сравнению с известными результатами в предположении использования гауссовских моделей помех. Степень эффективности зависит от параметров негауссовской помехи в виде коэффициентов асимметрии  $\gamma_3$ , эксцесса  $\gamma_4$  и может достигать наибольших значений для граничных значений области допустимых значений,

что соответствует неравенству  $\gamma_3^2 \leq \gamma_4 + 2$  [7, 8]. Из графиков также следует, что при увеличении параметра  $q$  эффективность нелинейных РП увеличивается, но уменьшается зависимость от параметров негауссовской помехи, а именно от коэффициента асимметрии и эксцесса.

## Выводы

В работе приведено построение метода проверки статистических гипотез для синтеза РП обнаружения сигналов на фоне коррелированных негауссовских помех. Получены аналитические выражения полиномиальных линейных и нелинейных РП обнаружения постоянных сигналов фоне коррелированных асимметричных и эксцесных негауссовских помех. Проведено исследование эффективности полученных результатов, которые показывают, что нелинейная обработка статистически зависимых выборочных значений и учет параметров негауссовской помехи в виде коэффициентов асимметрии и эксцесса позволяет повысить эффективность обнаружителей сигналов в виде уменьшения вероятностей ошибок первого и второго рода по сравнению с известными результатами при использовании гауссовских моделей случайных величин.

## Литература

1. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 696 с.
2. Ван Трис. Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции: В 3т. / Пер. с англ. под ред. В.И. Тихонова. – М.: Сов. радио, 1972. – Т.1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции. – 744 с.
3. Безрук В.М., Певцов Г.М. Теоретические основы проектирования систем распознавания сигналов для автоматизированного радиоконтроля: Монография. – Х.: Коллегиум, 2007. – 430 с.
4. Шелухин О.И., Беляков И.В. Негауссовские процессы. – СПб.: Политехника, 1992. – 312 с.
5. Тихонов В.А. Обобщенные модели линейного предсказания негауссовых процессов и их применение в задачах статистической радиотехники // Праці Міжнародної науково-практичної конференції «Обробка сигналів і негаусівських процесів» пам'яті професора Кунченка Ю.П.: Тези доповідей. – Черкаси: ЧДТУ, 2007. – С. 53–55.

6. *Rousseau D., Anand G.V., Chapeau-Blondeau F.* Noise-enhanced nonlinear detector to improve signal detection in non-Gaussian noise // *IEEE Signal Process.* – 2006. – Vol. 86, Issue 11. – P. 3456–3465.
7. *Малахов А.Н.* Кумулянтный анализ негауссовских процессов и их преобразований. – М.: Сов. радио, 1979. – 376 с.
8. *Кунченко Ю.П.* Стохастические полиномы. – К.: Наукова думка, 2006. – 275 с.
9. *Кунченко Ю.П., Палагин В.В.* Построение моментного критерия качества типа Неймана-Пирсона для проверки простых статистических гипотез // *Вестник Инженерной Академии Украины.* – 2005. – № 1. – С. 26–30.
10. *Палагин В.В.* Построение моментного критерия проверки статистических гипотез при использовании полиномиальных решающих правил // *Электронное моделирование.* – 2008. – Т.30. – С. 57–72.
11. *Палагин В.В., Жила О.М.* Синтез поліноміальних алгоритмів розпізнавання сигналів на тлі асиметричних негауссівських завад // *Праці Одеського національного політехнічного університету.* – 2007. – Вип. 2 (28). – С. 171–176.
12. *Палагин В.В., Жила О.М.* Поліноміальне вирішення задач розпізнавання випадкових сигналів // *Вісник ЧДТУ.* – 2008. – № 2. – С. 31–35.
13. *Палагин В.В., Івченко О.В.* Особливості оцінювання параметрів статистично залежних випадкових величин // *Вісник ЧДТУ.* – 2009. – № 2. – С. 73–78.
14. *Палагин В.В.* Моментний критерій качества проверки статистических гипотез для обработки сигналов на фоне коррелированных негауссовских помех // *Системы обработки інформації.* – 2009. – Вип. 4(78). – С. 96–101.
15. *Чурилов А.Н., Гессен А.В.* Исследование линейных матричных неравенств. Путеводитель по программным пакетам. – СПб.: Издательство Санкт-Петербургского ун-та, 2004. – 148 с.

УДК 621.391

О.В. Івченко

## Оцінювання дисперсії корельованої ексцесної завади методом максимізації полінома

Приведен практический пример использования нового алгоритма статистического оценивания параметров случайных негауссовских процессов при их моментно-кумулянтном описании. Найдена оценка дисперсии эксцесной коррелированной помехи. Проанализированы асимптотические свойства полученной оценки, показана ее эффективность с ростом степени стохастического полинома.

Examined of the use of new algorithm of statistical evaluation of parameters of the casual no Gaussian processes assumed that variate description of cumulant and moment . The assessment of a dispersion of statistically dependent no Gaussian exces that processes the correlated is found. Are analysed properties of assessments.

**Ключевые слова:** оценка параметров, выборка, моментно-кумулянтное описание, негауссовская случайная величина, корреляция, метод максимизации полинома, статистическая зависимость, коэффициент уменьшения дисперсии.

### Вступ

Актуальність побудови методів і алгоритмів обробки статистичних даних на основі спостережень обумовлена прагненням постійного підвищення точності вимірів (оцінювання) параметрів. Підвищення точності пов'язане з врахуванням у алгоритмах обробки всіх властивостей процесу, що спостерігається, зокрема наявності статистичних зв'язків між вибірковими значеннями [1]. Більшість класичних методів оцінювання оперують статистичними даними за умови відсутності статистичних зв'язків між ними. Так, наприклад, при оцінюванні дисперсії методом моментів [2] не враховуються значення багатомірних моментних функцій [3], що характеризують статистичні зв'язки. Оцінювання методом максимальної правдоподібності [2] вимагає знання багатомірних функцій розподілу, знаходження яких для реальних процесів є досить складним. Метод максимізації полінома [4, 5], на відміну від метода моментів, в своєму алгоритмі оперує всіма моментними і кумулянтними функціями, що дозволяє підвищити точність оцінки параметрів випадкових негауссівських процесів.

При цьому, якщо вибіркові значення є статистично пов'язаними, то доцільно використовувати адаптований метод максимізації полінома [6].

Метою роботи є розширення практичного застосування адаптованого методу максимізації полінома для виміру параметрів негауссівських процесів, що дозволяє отримати кращі імовірнісні характеристики оцінок в порівнянні з результатами класичних підходів.

### 1. Постановка задачі

Як досліджувана модель сигналу використовується близький до гауссівського стаціонарний корельований випадковий процес  $\xi(t, \vartheta)$  з нульовим математичним сподіванням  $m_1(\vartheta) = 0$ , який описується послідовністю моментних функцій  $m_{ij}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta)$  порядку  $i + j$  ( $i, j = \overline{0, s}$ ,  $v, k = \overline{0, n}$ ) двомоментного розподілу. Вважається, що моментні функції  $m_{ij}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta)$  є обмеженими, неперервними по  $\tau = |t_v - t_k|$  функціями і в загальному випадку залежать від одного і того ж параметра  $\vartheta$ , що приймає довільні значення на відкритому інтервалі. Як параметр  $\vartheta$  можуть виступати статистичні характеристики випадкового процесу, наприклад дисперсія, коефіцієнт асиметрії, коефіцієнт ексцесу і т. д.

Задача оцінювання може бути сформульована таким чином. Нехай із випадкового сигналу  $\xi(t, \vartheta)$  в моменти часу  $t_1, t_2, \dots, t_n$  беруться значення  $x_1 = \xi(t_1, \vartheta)$ ,  $x_2 = \xi(t_2, \vartheta)$ , ...,  $x_n = \xi(t_n, \vartheta)$ , причому дані значення однаково розподілені і статистично пов'язані між собою. Необхідно за однією реалізацією випадкового процесу  $\xi(t, \vartheta)$ ,  $t \in [-T; T]$ , яка мала місце при значенні параметра  $\vartheta = \vartheta_0$ , побудувати таку функцію від вибіркових значень  $\bar{\vartheta} = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , яка б була близькою до істинного значення параметра  $\vartheta$ .

В даній роботі як випадковий сигнал  $\xi(t, \vartheta)$  обраний ексцесний корельований випадковий процес з нульовим математичним сподіванням. Як зазначалось в роботі [7], його статистичний опис представлений у вигляді одномірних кумулянтних функцій  $\chi_2(\vartheta)$  і  $\chi_4(\vartheta)$ , а  $\chi_3 = 0$  і двомірних кумулянтних функцій:

$\chi_{11}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta)$ ,  $\chi_{13}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta)$  і  $\chi_{22}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta)$ , а  $\chi_{12}^{(v,k)}(t_v, t_k) = 0$ , які залежать від оцінюваного параметра  $\vartheta$ . Всі інші кумулянтні функції даного процесу можуть приймати довільні значення. При цьому статистичний зв'язок другого порядку, що спостерігається між вибірковими значеннями, характеризується кумулянтною функцією другого порядку (функція кореляції)  $\chi_{11}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) = \chi_2(\vartheta)R_{vk}(\tau)$ , яка носить експоненційний характер, тобто нормована кумулянтна функція (коефіцієнт кореляції) дорівнює  $R_{vk}(\tau) = e^{-A|\tau|}$ , де  $A > 0$  – коефіцієнт.

Інтервал кореляції визначається як:

$$\tau_0 = \int_0^{\infty} R_{vk}(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} e^{-A|\tau|} d\tau = \frac{1}{A}. \quad (1)$$

Необхідно за вибіркою  $\bar{x} = (x_1, \dots, x_n)$  знайти оцінку дисперсії  $\vartheta = \bar{\chi}_2$  за умови апіорної визначеності інших параметрів сигналу:  $\chi_4(\vartheta)$ ,  $\chi_{11}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta)$ ,  $\chi_{13}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta)$  і  $\chi_{22}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta)$ .

В роботі використаний адаптований метод максимізації полінома з застосуванням стохастичних поліномів до четвертого порядку [6].

## 2. Кореляційний опис ексцесних корельованих випадкових процесів

Для знаходження асимптотичної дисперсії оцінки дисперсії, відповідно до методики, запропонованої в роботі [6], необхідно знайти матрицю коефіцієнтів кореляції, яка визначає значення кореляційних зв'язків між всіма елементами досліджуваної вибірки:

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} 1 & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & 1 & \dots & R_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де  $|\mathbf{Z}|$  – визначник матриці коефіцієнтів кореляції.

Згідно з адаптованим методом максимізації полінома, в його алгоритмі використовують функції  $K_{ij}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta)$ , які для стаціонарних процесів двоментного розподілу визначаються наступним чином:

$$K_{ij}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) = M(\xi^i(t_v) - m_j(\vartheta))(\xi^j(t_k) - m_j(\vartheta)) = m_{ij}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) - \alpha_i(\vartheta)\alpha_j(\vartheta), \quad (3)$$

де  $\alpha_i(\vartheta)\alpha_j(\vartheta)$  – добуток одномірних моментних функцій сигналу  $\xi(t, \vartheta)$ .

Тоді для ексцесних корельованих випадкових процесів, згідно з формулою (3) з урахуванням формул зв'язку моментних і кумулянтних функцій для одноментного і двоментного розподілу [3] і значень цих функцій для даного процесу [7], отримуємо наступні значення функцій  $K_{ij}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta)$ :

$$\begin{aligned} K_{11}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) &= m_{11}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) - \alpha_1(\vartheta)\alpha_1(\vartheta) = \chi_{11}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta), \\ K_{12}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) &= 0, \\ K_{13}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) &= \chi_{13}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) + 3\chi_2(\vartheta)\chi_{11}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta), \\ K_{14}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) &= 0, \\ K_{22}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) &= \chi_{22}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) + 2\chi_{11}^{2(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta), \\ K_{23}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) &= 0, \\ K_{33}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) &= 6\chi_{31}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta)\chi_2(\vartheta) + 9\chi_{11}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta)\chi_{22}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) + 9\chi_2^2(\vartheta)\chi_{11}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) + 6\chi_{11}^{3(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta). \end{aligned} \quad (4)$$

Слід зазначити, що при відсутності кореляції між вибірковими значеннями кумулянтні функції двоментного розподілу перетворюються в кумулянти відповідного порядку одноментного розподілу. Тоді функції (4) перетворюються у добре відомі функції для некорельованих ексцесних випадкових величин [4]:

$$\begin{aligned} K_{11} &= \chi_2, \quad K_{12} = 0, \quad K_{22} = \chi_4 + 2\chi_2^2, \\ K_{13} &= \chi_4 + 3\chi_2^2, \quad K_{23} = 0, \quad K_{33} = 15\chi_2\chi_4 + 15\chi_2^3. \end{aligned}$$

## 3. Оцінювання дисперсії ексцесних корельованих випадкових сигналів

Згідно з алгоритмом адаптованого методу максимізації полінома [6], досліджувані статистичні дані  $x_1 = \xi(t_1, \vartheta)$ ,  $x_2 = \xi(t_2, \vartheta)$ , ...,  $x_n = \xi(t_n, \vartheta)$  представляються у вигляді стохастичного поліному степеня  $s$ :

$$I_{sn}(\bar{x}/\vartheta; \mathbf{Z}) = k_0(\vartheta; \mathbf{Z}) + \sum_{i=1}^s k_i(\vartheta; \mathbf{Z}) \sum_{v=1}^n x_v^i.$$



При цьому коефіцієнти полінома  $k_0(\vartheta; Z)$ ,  $k_i(\vartheta; Z)$  знаходяться по критерію мінімуму дисперсії шуканої оцінки [5]. Слід зазначити, що оцінка дисперсії випадкового сигналу може бути знайдена з використанням стохастичних поліномів степеня  $s = 2$  і вище.

Тоді оцінка  $\chi_2$  при моментному описі випадкового процесу і степені полінома  $S$  знаходиться з рішення рівняння:

$$\sum_{i=1}^s \sum_{v=1}^n h_{iv}(\vartheta, R_{vk}) \left[ x_v^i - \alpha_i(\vartheta) \right] \Big|_{\vartheta=\chi_2} = 0, \quad (5)$$

де  $x_v$  – статистично пов'язані і однаково розподілені вибіркові значення з досліджуваного випадкового процесу  $\xi(t, \vartheta)$ ;  $\alpha_i(\vartheta)$  – початкові моменти  $i$ -го порядку одномоментного розподілу ексцесного корельованого випадкового процесу [4];  $h_{iv}(\vartheta, R_{vk})$  – невідомі коефіцієнти, що крім оцінюваного параметра залежать від коефіцієнтів кореляції та знаходяться з рішення системи рівнянь:

$$\sum_{v=1}^n \sum_{j=1}^s h_{jv}(\vartheta, R_{vk}) K_{ij}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) = \frac{d}{d\vartheta} \alpha_i(\vartheta). \quad (6)$$

Для вирішення даної системи скористаємося формулами Крамера [8]:

$$h_{jv}(\vartheta, R_{vk}) = \frac{\Delta_{isv}(\vartheta, R_{vk})}{\Delta_s(\vartheta, R_{vk})}, \quad i, j = \overline{1, s}, \quad v = \overline{1, n},$$

де  $\Delta_s(\vartheta, R_{vk}) = \left| K_{ij}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta) \right|$  – визначник матриці розмірністю  $s$ , елементами якої є функції  $K_{ij}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta)$ ;  $\Delta_{isv}(\vartheta, R_{vk})$  – визначник, що отримується з  $\Delta_s(\vartheta, R_{vk})$  заміною  $i$ -го стовпця стовпцем, що складається з вільних членів системи рівнянь (6).

Тоді для другої степені стохастичного полінома маємо:

$$\begin{aligned} h_{1v}(\vartheta, R_{vk}) &= \frac{\Delta_{12v}(\vartheta, R_{vk})}{\Delta_2(\vartheta, R_{vk})}; \\ h_{2v}(\vartheta, R_{vk}) &= \frac{\Delta_{22v}(\vartheta, R_{vk})}{\Delta_2(\vartheta, R_{vk})}, \end{aligned} \quad (7)$$

де:  $\Delta_2(\vartheta, R_{vk}) = \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{vmatrix}$ ,  $Z_{11}$ ,  $Z_{12} = Z_{21}$ ,  $Z_{22}$  – матриці, що складені з елементів

$K_{ij}^{(v,k)}(t_v, t_k; \vartheta)$ ,  $i, j = \overline{1, 2}$ ,  $v, k = \overline{1, n}$ , відповідно.

Підставляючи коефіцієнти (7) в рівняння максимізації полінома (5), отримуємо:

$$\sum_{v=1}^n \frac{\Delta_{22v}(\vartheta, R_{vk})}{\Delta_2(\vartheta, R_{vk})} \left[ x_v^2 - \chi_2 \right] = 0.$$

Звідси отримуємо значення оцінки  $\overline{\chi_2}$ :

$$\overline{\chi_2} = \frac{\sum_{v=1}^n \Delta_{22v}(\vartheta, R_{vk}) x_v^2}{\sum_{v=1}^n \Delta_{22v}(\vartheta, R_{vk})}. \quad (8)$$

В рівнянні максимізації полінома третього степеня, з якого знаходиться оцінка дисперсії ексцесного корельованого випадкового процесу, коефіцієнти знаходяться з рішення системи трьох рівнянь (6).

Використовуючи метод Крамера, знайдемо значення коефіцієнтів:

$$h_{1v}(\vartheta, R_{vk}) = 0;$$

$$h_{2v}(\vartheta, R_{vk}) = \frac{\Delta_{23v}(\vartheta, R_{vk})}{\Delta_3(\vartheta, R_{vk})};$$

$$h_{3v}(\vartheta, R_{vk}) = 0,$$

де  $\Delta_{23}(\vartheta, R_{vk})$  – визначник, що отримується з  $\Delta_3(\vartheta, R_{vk})$  заміною 2-го стовпця стовпцем, що складається з вільних членів системи рівнянь (6).

Використовуючи вираз для початкового моменту  $\alpha_2(\vartheta)$  та значення коефіцієнта  $h_{2v}(\vartheta, R_{vk})$ , легко отримати, що рівняння максимізації полінома третього степеня набуває вигляду:

$$\sum_{v=1}^n \frac{\Delta_{23v}(\vartheta, R_{vk})}{\Delta_3(\vartheta, R_{vk})} \left[ x_v^2 - \chi_2 \right] = 0.$$

З останнього рівняння знаходимо значення оцінки  $\overline{\chi_2}$ :

$$\overline{\chi_2} = \frac{\sum_{v=1}^n \Delta_{23v}(\vartheta, R_{vk}) x_v^2}{\sum_{v=1}^n \Delta_{23v}(\vartheta, R_{vk})}. \quad (9)$$

Якщо вибірка є некорельованою, то  $\Delta_{22v}(\vartheta, R_{vk}) = \Delta_{23v}(\vartheta, R_{vk}) = 1$  і оцінка дисперсії, згідно з формулами (8) і (9), дорівнює класичній оцінці [8]:

$$\overline{\chi_2} = \frac{\sum_{v=1}^n x_v^2}{n}.$$

Розглянемо збільшення степеня стохастичного полінома.

В рівнянні максимізації полінома четвертого степеня, коефіцієнти (6) знаходяться з рішення системи чотирьох рівнянь.

Використовуючи формули Крамера, знаходимо значення коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} h_{1v}(\vartheta, R_{vk}) &= \frac{\Delta_{14v}(\vartheta, R_{vk})}{\Delta_4(\vartheta, R_{vk})}; \\ h_{2v}(\vartheta, R_{vk}) &= \frac{\Delta_{24v}(\vartheta, R_{vk})}{\Delta_4(\vartheta, R_{vk})}; \\ h_{3v}(\vartheta, R_{vk}) &= \frac{\Delta_{34v}(\vartheta, R_{vk})}{\Delta_4(\vartheta, R_{vk})}; \\ h_{4v}(\vartheta, R_{vk}) &= \frac{\Delta_{44v}(\vartheta, R_{vk})}{\Delta_4(\vartheta, R_{vk})}, \end{aligned} \quad (10)$$

де  $\Delta_{i4v}(\vartheta, R_{vk})$  — визначник, що отримується з  $\Delta_4(\vartheta, R_{vk})$  заміною  $v$ -го стовпця стовпцем, що складається з вільних членів системи рівнянь,  $i = 1, \dots, 4$ .

Розв'язок рівняння максимізації полінома при  $s = 4$  (5) можливий лише чисельними методами.

#### 4. Асимптотичні властивості оцінки параметра дисперсії

Як відомо [4, 5], асимптотична дисперсія оцінки за методом максимізації полінома обернено пропорційна кількості добутої інформації про досліджуваний параметр, яка згідно з роботою [6] дорівнює:

$$J_{sn}(\vartheta) = \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^n h_{iv}(\vartheta; R_{vk}) \frac{d}{d\vartheta} \alpha_i(\vartheta). \quad (11)$$

Підставивши в формулу (11) значення коефіцієнтів стохастичного полінома другого степеня (7), отримуємо значення асимптотичної дисперсії оцінки  $\bar{\chi}_2$ :

$$\sigma_{(\bar{\chi}_2)2} = J_{2n}^{-1}(\vartheta) = \frac{\Delta_2(\vartheta, R_{vk})}{\sum_{v=1}^n \Delta_{22v}(\vartheta, R_{vk})}. \quad (12)$$

При третій степені полінома асимптотична дисперсія оцінки  $\bar{\chi}_2$  буде дорівнювати:

$$\sigma_{(\bar{\chi}_2)3} = J_{3n}^{-1}(\vartheta) = \frac{\Delta_3(\vartheta, R_{vk})}{\sum_{v=1}^n \Delta_{23v}(\vartheta, R_{vk})}. \quad (13)$$

Аналіз відношення чисельника і знаменника в виразах (12) і (13) показує їх еквівалентність, тобто при другій і третій степені стохастичного

полінома оцінки кумулянта другого порядку мають однакову дисперсію.

При значеннях коефіцієнта кореляції, що прямують до нуля, дисперсії (12) і (13) оцінки параметра  $\chi_2$  прямують до дисперсії оцінки при незалежній вибірці [2]:

$$\sigma_{(\bar{\chi}_2)} = \chi_2^2 \frac{\gamma_4 + 2}{n}.$$

Дисперсія оцінки  $\bar{\chi}_2$  при четвертій степені стохастичного полінома дорівнює:

$$\begin{aligned} \sigma_{(\bar{\chi}_2)4} = J_{4n}^{-1}(\vartheta) &= \left[ \sum_{v=1}^n \frac{\Delta_{24v}(\vartheta, R_{vk})}{\Delta_4(\vartheta, R_{vk})} + \right. \\ &\left. + \sum_{v=1}^n \frac{\Delta_{44v}(\vartheta, R_{vk})}{\Delta_4(\vartheta, R_{vk})} 2\chi_2(\gamma_4 + 3) \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (14)$$

де  $\gamma_4$  — коефіцієнт ексцесу випадкового сигналу  $\xi(t, \vartheta)$ .

На рис. 1 наведена залежність дисперсії оцінки параметра  $\chi_2$  при степенях полінома  $s = 2, 3$  і  $s = 4$  від параметра  $A$  кореляційної функції при фіксованому значенні об'єму вибірки  $n = 500$  та коефіцієнта ексцесу  $\gamma_4$ .

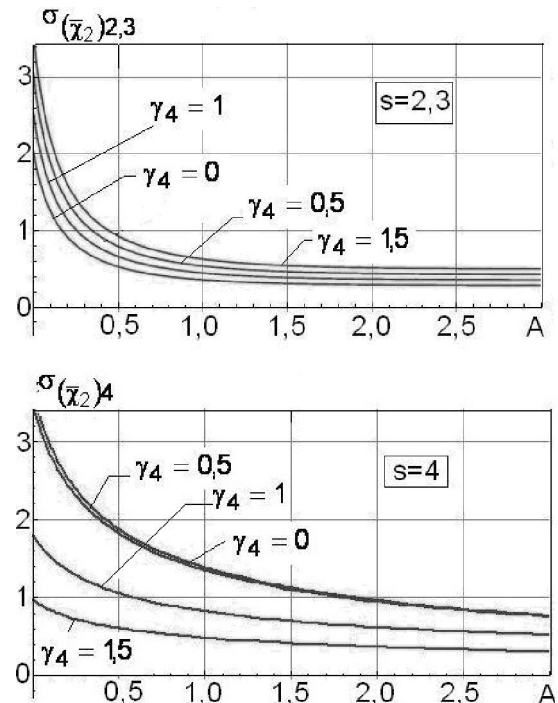


Рис. 1.

З графіка видно, що при збільшенні інтервалу кореляції  $\tau_0$  (1) між вибірковими значеннями, що взяті з досліджуваного процесу, дисперсія оцінки збільшується.

Для кількісного визначення зменшення дисперсії оцінки  $\bar{\vartheta}$  довільного параметра  $\vartheta$ , що знайдена методом максимізації полінома при

степені полінома  $s$ , в порівнянні з дисперсією оцінки при степені полінома  $k$  введений коефіцієнт зменшення дисперсії цих оцінок:

$$g(\bar{\vartheta}) = \frac{\sigma(\bar{\vartheta})_s}{\sigma(\bar{\vartheta})_k}$$

Графік залежності коефіцієнта зменшення дисперсії  $g(\bar{\chi}_2)$  оцінки  $\bar{\chi}_2$  при степенях полінома  $s = 4$  і  $k = 2$  від значень параметра  $A$  кореляційної функції при фіксованих значеннях параметра ексцесу  $\gamma_4$  при об'ємі вибірки  $n = 500$  наведений на рис. 2.

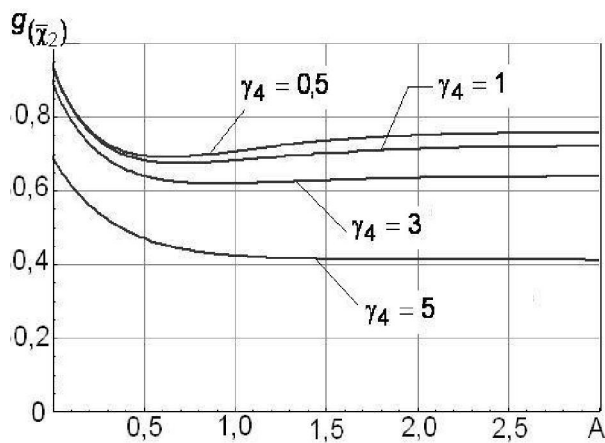


Рис. 2.

З графіка видно, що при степені полінома  $s = 4$  дисперсія оцінки менша ніж при степені полінома  $k = 2$ . При цьому, при прямуванні значення  $\gamma_4$  до правого краю області визначення  $(-0,327; 9,623)$  [3] величина  $g(\bar{\chi}_2)$ , а тому і дисперсія, що знайдена з рівняння (14), зменшується. Високі значення інтервалу кореляції  $\tau_0$  (1) між вибірковими значеннями, що взяті з досліджуваного процесу, призводять до збільшення дисперсії оцінок. При значеннях параметра  $A$  кореляційної функції більших 1,5 вплив кореляційного зв'язку на значення дисперсії відсутній.

## Висновки

1. Отримані формули для знаходження оцінки дисперсії ексцесного корельованого випадкового сигналу при його моментно-кумулянтному описі з використанням стохастичних поліномів до четвертого степеня.

2. Отримані формули для визначення дисперсії знайденої оцінки. Показана залежність дисперсії оцінки від значень інтервалу кореляції між вибірковими значеннями.

3. Показано, що ефективність оцінки збільшується з ростом степеня полінома.

4. Показано, що на значення дисперсії оцінки впливають параметри негауссовості (коефіцієнт ексцесу), тому врахування в алгоритмі обробки випадкових даних всіх моментних функцій дозволяє підвищувати точність оцінювання.

## Література

1. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ: Пер. с англ. Под ред. Б.В. Гнеденко – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. – 500 с.
2. Кендалл М., Стюарт А. Статистические выводы и связи: Пер. с англ. / Под ред. А.Н. Колмогорова – М.: Наука, 1973. — 900 с.
3. Малахов А.Н. Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразование. – М.: Сов. радио, 1978. – 376 с.
4. Кунченко Ю.П. Полиномиальные оценки параметров близких к гауссовским случайных величин. Часть I. Стохастические полиномы, их свойства и применение для нахождения оценок параметров. – Черкассы: ЧИТИ, 2001. – 133 с.
5. Кунченко Ю.П. Стохастические полиномы. – К.: Наукова Думка, 2006. – 275 с.
6. Палагін В.В., Івченко О.В. Адаптація методу максимізації полінома для оцінки параметрів випадкових величин за статистично-залежною вибіркою // Системи обробки інформації. – Харків, 2009. – Вип. 2(76). – С. 118–123.
7. Палагін В.В., Івченко О.В. Особливості оцінювання параметрів статистично залежних випадкових величин // Вісник ЧДТУ. – 2009. – № 1. – С. 73–78.
8. Крамер Г. Математические методы статистики: Пер. с англ. / Под ред. А.Н. Колмогорова. – М.: Мир, 1975. – 684 с.

## Методы и средства обработки сигналов и изображений

УДК 681.778 – 681.069

А.Т. Орлов, канд. техн. наук, Г.Н. Розоринов, д-р техн. наук, Е.Г. Розоринова

### Особенности расчета потерь, возникающих при соединении ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Рассмотрены виды соединения оптических волокон кабелей связи и уточнены основные расчетные соотношения, позволяющие определить возникающие при этом потери оптического сигнала.

The types of optical cable fibres connection and basic calculated correlations are considered and precised allowing to define the appearing here optical signal losses.

**Ключевые слова:** оптическое волокно, соединители, френелевское отражение.

#### Введение

Соединение оптических кабелей приводит к потерям энергии оптического сигнала, при этом потери в самих соединениях могут превышать уровень километрического затухания волокон. Выбор типа оптического волокна (ОВ) определяется не только техническими требованиями, но и во многих случаях его стоимостью. Для связи на небольшие расстояния могут использоваться соединители и ОВ с относительно большими потерями и низкой стоимостью, в том числе многомодовые (ММ) ОВ. Конструкция волокон в оболочке с защитным покрытием показана на рис. 1, а их основные характеристики сведены в табл. 1 [1].

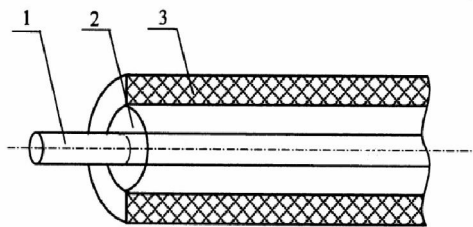


Рис. 1. Оптическое волокно: 1 – сердцевина; 2 – оболочка; 3 – защитное покрытие

Диаметр сердцевины ММ ступенчатого ОВ обычно превышает несколько десятков мкм, числовая апертура составляет 0,2...0,4, оптические потери – 1...3 дБ/км, частотная полоса пропускания – 50...100 МГц·км. Оболочка таких ОВ может быть как стеклянной, так и пластмассовой. В одномодовом (ОМ) ОВ для передачи сигналов с длинами волн  $\lambda = 1,3$  и  $\lambda = 1,55$  мкм диаметр серд-

цевины составляет 8...9 мкм (оболочки – 125 мкм), числовая апертура – около 0,1, оптические потери находятся в диапазоне 0,3...0,5 дБ/км, частотная полоса пропускания превышает 100 ГГц·км.

При эксплуатации волоконно-оптических линий возникает необходимость их соединений [2]. Наиболее характерными примерами являются соединения типа: источник излучения – ОВ; ОВ – ОВ; ОВ – приемник излучения. Различают неразъемные и разъемные соединения ОВ (рис. 2). Неразъемные соединения используются в местах постоянного монтажа кабельных систем. Разъемные соединения допускают многократное соединение/разъединение кабелей и компонентов систем. Промежуточное положение занимают соединения типа механического сплайса.

Основная трудность при соединении волокон заключается в их малых поперечных размерах. Требуется микрометрическая точность при стыковке подготовленных (сколотых, полированных) торцов соединяемых ОВ. Причем юстировка должна обеспечить не только соосность волокон, но и минимально возможный зазор между их торцами, чтобы предотвратить оптические потери.

Целью работы является систематизация видов оптических потерь, возникающих при разных способах соединения волокон, уточнение и обобщение расчетных формул, приведенных в различных литературных источниках.

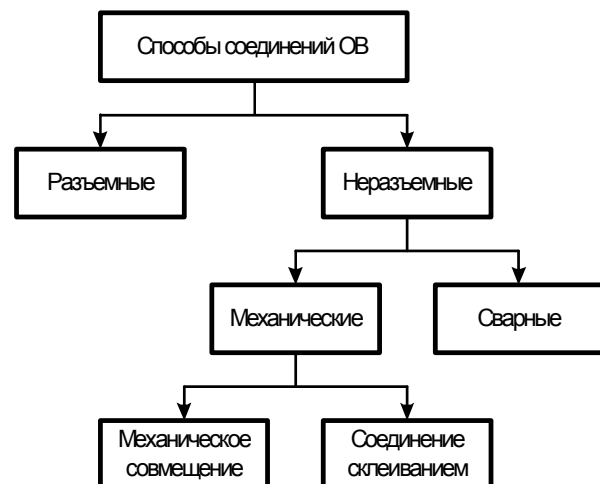


Рис. 2. Основные способы соединений ОВ

Таблица 1. Характеристики некоторых ОВ

Тип ОВ	Диаметр сердцевин/оболочки, мкм	Оптические потери, дБ/км			Полоса пропускания ( $\lambda = 1300$ нм), МГц·км
		$\lambda = 0,85$ мкм	$\lambda = 1,31$ мкм	$\lambda = 1,55$ мкм	
Многомодовое ступенчатое	50/125	3	1	—	100
Многомодовое градиентное	62,5/125	3	1	—	160...500
	85/125	3	1	—	500...2000
	100/140	3	1	—	500...2000
Одномодовое ступенчатое	4...5/80	—	0,4	0,3	>1000
	8...9/125	—	0,5	0,25	>10 <sup>9</sup>
Пластмассовое	1000	~1000 ( $\lambda = 0,665$ мкм)	—	—	~5

**Основная часть**

К устройствам соединения ОВ предъявляют следующие основные требования: малые вносимые потери, малое обратное отражение, устойчивость к внешним механическим, климатическим и другим воздействиям, высокая надежность и простота конструкции, незначительное ухудшение параметров после многократных соединений/разъединений.

Вносимые потери зависят от типа ОВ (одномодовое или многомодовое), типа и качества соединителя и составляют 0,25...3 дБ. Коэффициент передачи оптической мощности при

соединении волокон торец к торцу определяется как

$$K_T = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{P_{\text{вх}} - P_{\text{отр}}}{P_{\text{вх}}} < 1, \quad (1)$$

а соответствующие ему вносимые соединением потери (дБ) –

$$a_T = -\lg K_T = -10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{вх}}$ ,  $P_{\text{вых}}$ ,  $P_{\text{отр}}$  – оптические мощности на входе, выходе и отражения, соответственно.

Различают вносимые потери внутренние и внешние (рис. 3).



Рис. 3. Вносимые потери при соединении ОВ

Внутренние потери вызваны факторами, которые невозможно контролировать и они складываются аддитивно. Величина этих потерь изменяется случайным образом даже в случае одного стандарта ОВ и одного производителя. На внутренние потери оказывает влияние технология производства ОВ и критерии контроля его параметров при вытяжке, но не конструкция соединителя.

Формулы для расчета вносимых потерь при идеальном соединении неидентичных ОВ приведены в табл. 2. Здесь введены такие обозначения:  $a$  – радиус сердцевин ОВ;  $w$  – радиус модового поля ОВ;  $n_1, n_2$  – показатели

преломления веществ по обе стороны границы раздела

Потери из-за различия диаметров ОВ возникают, когда диаметр передающего ОВ  $2a_1$  больше диаметра принимающего ОВ  $2a_2$ . В противном случае потери не возникают. Аналогично, если значение числовой апертуры  $NA_1 < NA_2$ , то потери отсутствуют. Потери вследствие френелевского отражения существуют всегда ввиду различия показателей преломления сердцевин ОВ независимо от направления распространения световой волны.

Таблица 2. Потери при идеальном соединении ОВ

Тип ОВ	Факторы, обуславливающие потери	Расчетная формула, дБ
ММ	Различие в диаметрах сердцевин $2a_1 > 2a_2$	$a_d = -10 \lg \frac{a_1^2}{a_2^2}$
	Различие в значениях числовых апертур $NA_1 > NA_2$	$a_{NA} = -10 \lg \frac{NA_1^2 - NA_2^2}{NA_1^2}$
	Поперечное смещение (между осями) $x$	$a_x = -10 \lg \frac{4x}{\pi d}, \quad d = 2a$
	Угловое смещение (наклон торцов) $\varphi$	$a_\varphi = -10 \lg \left( 1 - \frac{2\varphi}{\pi \sqrt{2\Delta}} \right), \quad \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$
	Френелевское отражение от торцов	$a_{\text{фр}} = -10 \lg \left[ 1 - \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \right]$
ОМ	Различие в диаметрах модовых полей $2w_1 > 2w_2$	$a_w = -10 \lg \frac{2w_1 w_2}{w_1^2 + w_2^2}$
	Различие в диаметрах сердцевин $2a_1 > 2a_2$	$a_d = -10 \lg \frac{a_1^2}{a_2^2}$
	Поперечное смещение (между осями) $x$	$a_x = -10 \lg \left[ \exp \left( -\frac{x^2}{w^2} \right) \right]$
	Угловое смещение (наклон торцов) $\varphi$	$a_\varphi = -10 \lg \left[ \exp \left( -\frac{\pi n_2 w \varphi}{\lambda} \right)^2 \right]$
	Френелевское отражение от торцов	$a_{\text{фр}} = -10 \lg \left[ 1 - \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \right]$

Внешние потери определяются механическими (геометрическими) погрешностями, плохим качеством подготовки торцов ОВ (шероховатостью), загрязнением зазора между ними, а также френелевским отражением. Формулы для расчета составляющих внешних потерь в соединениях одинаковых ОВ различных типов приведены в табл. 3.

Следует отметить, что расчеты потерь при соединениях ОВ, особенно при наличии зазора между ними, является сложной математической задачей, которая в настоящее время полностью не решена, поэтому на практике пользуются приближенными соотношениями. В табл. 2, 3 сведены уточненные формулы для

расчета потерь, приведенные в работах [3–5].

Для оценки качества соединения используются также такие параметры как коэффициент отражения

$$R_{\text{фр}} = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (3)$$

и потери обратного отражения (дБ)

$$b_{\text{фр}} = 10 \lg R_{\text{фр}} = 10 \lg \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{вх}}}, \quad (4)$$

где  $n_1, n_2$  – показатели преломления веществ по обе стороны границы раздела (рис. 4).

Таблица 3. Внешние потери при соединении ОВ различных типов

Тип ОВ	Продольное смещение $s$ , дБ	Поперечное смещение $x$ , дБ	Угловое смещение $\varphi$ , дБ
Многомодовое ступенчатое	$a_s = -10 \lg \left( 1 - \frac{sNA}{4an_0} \right)$	$a_x = -10 \lg \left[ \frac{2}{\pi} \left( \arccos \frac{x}{2a} - \frac{x}{2a} \sqrt{1 - \frac{x^2}{4a^2}} \right) \right]$ , $a_x = 10 \lg \left( 1 - \frac{2x}{\pi a} \right)$ , $\frac{x}{a} < 0,2$	$a_\varphi = -10 \lg \left( 1 - \frac{n_0 \varphi}{\pi NA} \right)$
Многомодовое градиентное	$a_s = -10 \lg \left( 1 - \frac{4 sNA}{3\pi an_0} \right)$ (для малых $s$ )	$a_x = -10 \lg \left( 1 - \frac{8x}{3\pi a} \right)$ (для малых $x$ )	$a_\varphi = -10 \lg \left( 1 - \frac{8\varphi}{3\pi \frac{n_1}{n_0} \sqrt{2\Delta}} \right)$ , $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$
Одномодовое ступенчатое	$a_s = -10 \lg \left[ \frac{4(z^2 + 1)}{(4z^2 + 2)^2 + 4z^2} \right]$ , $z = \frac{3\lambda}{2\pi n_2 w^2}$	$a_x = -10 \lg \exp \left( -\frac{x^2}{w^2} \right)$	$a_\varphi = -10 \lg \exp \left[ -\left( \frac{\pi n_2 w \varphi}{\lambda} \right)^2 \right]$
Потери френелевского отражения	$a_{\text{фр}} = -10 \lg \left( \frac{2n_1 n_0}{n_1^2 + n_0^2} \right)$	$a_{\text{фр}} = -10 \lg \left[ \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \right]$	—

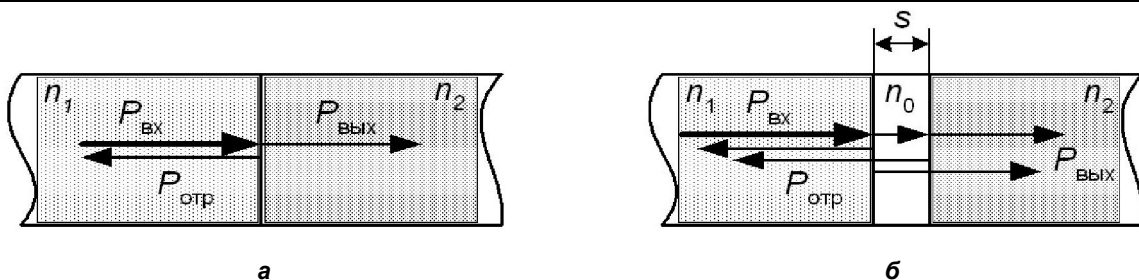


Рис. 4. Обратное отражение оптической мощности от торцов ОВ

Например, для границы раздела сердцевина ОВ – воздух получаем из соотношения (3):  $n_1=1,64$ ;  $n_2=1,0$ ;  $R_{\text{фр}}=0,035$ ;  $b_{\text{фр}}=-14,6$  дБ. То есть 3,5 % оптической мощности отражается от гладкого торца ОВ.

Основной вклад в обратное отражение вносит френелевское отражение из-за зазора  $s$  (обычно воздушного) между торцами ОВ (рис. 4, б). Поэтому наиболее общее выражение для коэффициента отражения имеет следующий вид [3]:

$$R_{\text{фр}} = \frac{(n_1 - n_0^2)^2 \sin^2\left(\frac{2\pi n_0 s}{\lambda}\right)}{4n_1^2 n_0^2 + (n_1 + n_0^2)^2 \sin^2\left(\frac{2\pi n_0 s}{\lambda}\right)}, \quad (5)$$

где  $n_1$ ,  $n_0$  – показатели преломления сердцевины ОВ (одинаковые для обоих ОВ) и среды в зазоре, соответственно. Обычно пренебрегают разницей в показателях преломления соединяемых ОВ. В соответствии с законом сохранения энергии  $R_{\text{фр}} + K_{\text{T}} = 1$ . Непараллельность торцов приводит к разным значениям зазора  $s$  (разным показателям преломления среды в зазоре  $n_0'$ ) для различных участков сердцевины. В этом случае обратные потери  $b_{\text{фр}}$ , дБ, определяются по усредненным значениям  $\overline{R_{\text{фр}}}$ :

$$b_{\text{фр}} = 10 \lg \overline{R_{\text{фр}}} = 10 \lg \frac{(n_1 - n_0')^2}{(n_1 + n_0')^2}. \quad (6)$$

Например, можно посчитать, что при  $n_1=1,5$  и  $n_0'=1,0$   $b_{\text{фр}} = -11$  дБ. Теоретически коэффициент отражения  $R_{\text{фр}}$  может быть и нулевым при некоторых значениях зазора  $s$ , но практически этого не бывает. Более того, это выполнялось бы только для одной длины волны или узкого диапазона длин волн. То есть только уменьшением зазора можно несколько снизить обратные потери. В табл. 4 приведены полученные в работе значения вносимых и обратных потерь для некоторых отношений  $\frac{s}{\lambda}$  при  $n_1=1,5$  и  $n_0=1,0$ , которые близки к результатам работы [3].

Отражение не только ослабляет прямой световой поток, но и увеличивает обратный поток, который может достигать передающего оборудования и значительно ухудшать параметры излучения, например, модовый состав, ширину спектральной линии излучения и уровень собственных шумов. Из табл. 4 видно, что

при значениях  $\frac{s}{\lambda} < 0,1$  вклад френелевского отражения во вносимые потери мал, однако, именно оно ухудшает параметры излучения.

На практике создание строго перпендикулярных осей плоских торцов ОВ для обеспечения их физического контакта (Physical Contact – PC) затруднительно. Даже небольшие отклонения на угол  $\alpha=0,05^\circ$  между плоскостями концов ОВ приводят к зазору около 1 мкм (при диаметре конца 2,5 мм) (рис. 5, а). При сферически выпуклых поверхностях обоих торцов соприкосновение всегда происходит в окрестности светонесущей сердцевины волокон (рис. 5, б).

На практике по уровню потерь обратного отражения различают три типа физических контактов: PC < -30 дБ, Super PC < -40 дБ, Ultra PC < -50 дБ. Радиус кривизны  $r$  в PC-соединениях лежит в диапазоне 15...25 мм. При этом столь широкий диапазон значений  $r$  объясняется не технологией процесса полирования торцов, а предъявляемыми требованиями к конструкциям и элементам соединителей (металлические, керамические).

Величина обратного рассеяния может быть существенно снижена при использовании соединителей с угловым физическим контактом (Angled PC – APC) (рис. 5, в). При наклоне торцов, даже при отсутствии физического контакта, отраженная часть мощности не распространяется обратно по сердцевине ОВ, а уходит в оболочку. Потери на обратное отражение для APC-соединителей ниже минус 60 дБ. Для стандартного ступенчатого ОМ ОВ угол наклона  $\beta=8^\circ$ , что приводит к потерям на обратное отражение около минус 70 дБ. При использовании ОМ ОВ со смещенной дисперсией, которое имеет большую числовую апертуру по сравнению со ступенчатым, для обеспечения низких потерь на обратное отражение, угол наклона делают больше, обычно  $\beta=12^\circ$ . Как вариант APC-соединения может быть использован сферически выпуклый-вогнутый физический контакт (рис. 5, г). При этом выпуклый торец плотно входит в вогнутый торец соосно сердцевинам. Потери на обратное отражение такого соединителя ниже минус 75 дБ. Однако для него имеет значение направление передачи светового потока, потому что в противном случае отраженная часть мощности не уходит в оболочку. APC-соединители ввиду сложности технологии изготовления и высокой стоимости используются в гибридных волоконно-коаксиальных сетях широкополосного доступа и высокоскоростных цифровых оптических магистралях.



Таблица 4. Зависимость потерь от величины зазора

$\frac{s}{\lambda}$	Коэффициент передачи $K_T$	Вносимые потери $a_T$ , дБ	Коэффициент отражения $R_{фр}$	Обратные потери $b_{фр}$ , дБ
0,250	0,85001	0,69530	0,14795	-8,4
0,100	0,94339	0,25293	0,05657	-12,6
0,050	0,98360	0,07140	0,01633	-18,0
0,020	0,99722	0,01187	0,00275	-25,8
0,010	0,99930	0,00295	0,00067	-31,8
0,005	0,99980	0,00075	0,00018	-37,6
0,002	0,99997	0,00013	0,00003	-45,2
0,001	0,99999	0,00004	0,00001	-51,3

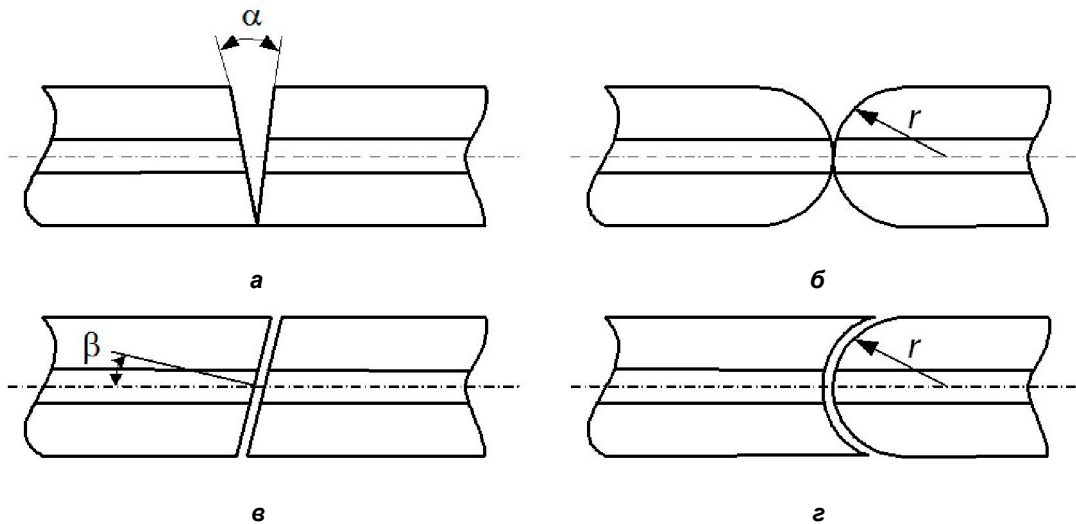


Рис. 5. Варианты физического контакта ОВ

### Выводы

1. Рассмотрены и систематизированы виды оптических потерь и способы разъемного соединения ОВ кабелей связи. Приведены уточненные расчетные соотношения, позволяющие определить оптические потери при разных способах соединения ОВ.

2. Несмотря на относительно небольшой вклад френелевского отражения во вносимые оптические потери, оно не только ослабляет прямой световой поток в соединениях ОВ разных типов, но и увеличивает обратный световой поток, который ухудшает параметры излучения.

### Литература

1. *Косяченко Л.А.* Основы интегральной та волоконной оптики: Навч. посіб. – Чернівці: Рута, 2008. – 348 с.
2. *Розорінов Г.М., Соловйов Д.О.* Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку. – К.: Ліра-К, 2007. – 198 с.
3. *Корнейчук В.И.* Измерение параметров компонентов и устройств ВОСП: Учебн. пособ. – Одесса: УГАС им. А.С. Попова, 2000. – 323 с.
4. *Семенов А.Б.* Волоконно-оптические подсистемы современных СКС. – М.: Академия АйТи; ДМК Пресс, 2007. – 632 с.
5. *Бейли Д., Райи Э.* Волоконная оптика: теория и практика. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2006. – 320 с.

## Акустические приборы и системы

УДК 681.586

В.Г. Савин<sup>1</sup>, д-р техн. наук, В.М. Шарапов<sup>2</sup>, д-р техн. наук, И.О. Моргун<sup>1</sup>, канд. техн. наук

### Математическое моделирование работы цилиндрического пьезокерамического трансформатора с двумя секциями генераторных электродов

Рассмотрена задача об установившихся электроупругих колебаниях цилиндрического пьезоэлектрического трансформатора с двумя секциями генераторных электродов. При постановке и решении задачи привлекается линейная теория тонких электроупругих оболочек при смешанных электрических граничных условиях: электрического напряжения на одной из ее частей и тока смещения – на другой. Получены выражения, позволяющие вычислять все основные электромеханические характеристики динамического процесса – перемещения, электрическую напряженность пьезокерамики, электрическое напряжение на генераторных электродах.

A task is considered about the steady electro elastic oscillations of the cylindrical piezoelectric transformer with two generative electrodes. At raising and decision of task the linear theory of thin electro elastic shells under the mixed electric boundary conditions: electric voltage on one of its parts and a displacement current – on another. The expressions allowing calculating, of all basic electromechanical characteristics of dynamic process – displacements, piezoelectric strength, electric voltages on generative electrodes, are got.

**Ключевые слова:** цилиндрический пьезо-керамический трансформатор, электроупругая оболочка, электроупругие колебания.

#### Введение

Пьезоэлектрические трансформаторы представляют собой пьезопреобразователи с несколькими (больше трех) электрически не связанными электродами. Электроды, подключенные к источнику электрического напряжения, называют возбудителем. Электроды, подключенные к электрической нагрузке, называют генератором [1]. Пьезоэлектрические трансформаторы отличаются по внешнему виду, расположению и размерам электродов возбудителя и генератора, различным схемам их коммутации [1–3]. Пьезотрансформаторы в основном являются трансформаторами напряжения, также созданы пьезоэлектрические трансформаторы тока [2]. Пьезоэлектрические транс-

форматоры напряжения в большинстве случаев выполняют в виде однослойных или многослойных стержней, прямоугольных пластин, дисков, колец.

Как показывает анализ известных научных публикаций по данной тематике, математические модели разработаны в основном для пьезотрансформаторов в виде стержня, пластины прямоугольной либо круглой формы [4–6]. Что касается преобразователей, выполненных в виде пьезокерамических оболочек с секционированными электродами, то существует только одна публикация, посвященная математическому моделированию задачи об установившихся электроупругих колебаниях цилиндрического пьезоэлектрического трансформатора с одной секцией генераторных электродов [7].

Целью данной работы является разработка математической модели, позволяющей рассчитывать электроупругие колебания цилиндрической пьезокерамической оболочки содержащей две пары электродов генератора электрически не связанных между собою.

#### Математическая постановка задачи

Исходные уравнения, также как в случае с одной секцией генераторных электродов, включают:

1. уравнения движения пьезокерамической цилиндрической радиально поляризованной оболочки (плоский случай) [8]

$$\begin{aligned}
 & \left[ 1 + \frac{h^2}{12R^2} \left( 1 + \frac{e_{13}^2}{C_{11}^E \epsilon_{33}^s} \right) \right] \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial w}{\partial \theta} - \\
 & - \frac{h^2}{12R^2} \left( 1 + \frac{e_{13}^2}{C_{11}^E \epsilon_{33}^s} \right) \frac{\partial^3 w}{\partial \theta^3} - \\
 & - \frac{e_{13} R}{C_{11}^E} \frac{\partial E_r^{(0)}}{\partial \theta} = \frac{R^2 \gamma}{C_{11}^E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (1) \\
 & - \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{h^2}{12R^2} \left( 1 + \frac{e_{13}^2}{C_{11}^E \epsilon_{33}^s} \right) \frac{\partial^3 u}{\partial \theta^3} - w - \\
 & - \frac{h^2}{12R^2} \left( 1 + \frac{e_{13}^2}{C_{11}^E \epsilon_{33}^s} \right) \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4} + \\
 & + \frac{e_{13} R}{C_{11}^E} E_r^{(0)} = \frac{R^2 \gamma}{C_{11}^E} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2};
 \end{aligned}$$

2. выражение индукции  $D_r$  для цилиндрической оболочки, записанное с использованием соотношений Коши [4]

$$D_r = e_{13} \left( \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{w}{R} \right) + \varepsilon_{33}^s E_r^{(0)}, \quad (2)$$

где  $h$  – толщина оболочки;  $R$  – радиус серединной поверхности оболочки;  $e_{13}$ ,  $C_{11}^E$ ,  $\varepsilon_{33}^s$ ,  $\gamma$  – пьезомодуль, модуль упругости, диэлектрическая проницаемость и плотность пьезокерамики, соответственно;  $u$ ,  $w$  – тангенциальная и нормальная составляющие перемещений серединной поверхности оболочки;  $\theta$  – угловая координата;  $E_r^{(0)}$ ,  $D_r$  – радиальные компоненты напряженности серединной поверхности оболочки и индукции электрического поля (в последующем индексы « $r$ » и «(0)» опускаем);  $t$  – время.

Запишем исходные уравнения (1), (2) в безразмерном виде, разделив  $w$ ,  $u$ ,  $R$ ,  $h$  на  $R$ ;  $t$  на  $R/c_k$ ;  $E$  на  $1/d_{33}$ ;  $D$  на  $e_{13}$ :

$$\begin{cases} (1+\delta) \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial w}{\partial \theta} - \delta \frac{\partial^3 w}{\partial \theta^3} - v \frac{\partial E}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial u}{\partial \theta} - \delta \frac{\partial^3 u}{\partial \theta^3} + w + \delta \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4} - v E = -\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}; \end{cases} \quad (3)$$

$$D = \frac{\partial U}{\partial \theta} + w + \frac{1}{\varepsilon} E, \quad (4)$$

где  $c_k$  – скорость звука в пьезокерамике;  $d_{33}$  – ее пьезомодуль.

Определим постоянные коэффициенты, входящие в уравнения (3) и (4):

$$\delta = \frac{h^2}{12R^2} \left( 1 + \frac{e_{13}^2}{C_{11}^E \varepsilon_{33}^s} \right); \quad v = \frac{e_{13}}{C_{11}^E \varepsilon_{33}^s}; \quad \varepsilon = \frac{e_{13} d_{33}}{\varepsilon_{33}^s}.$$

На внешнюю и внутреннюю поверхности пьезокерамической оболочки нанесены металлизированные электроды. Внутренний электрод сплошной и заземлен, а внешний – разделен в осевом направлении разрезами на несколько электрически не связанных частей. Шириной разрезов и толщиной электродированных покрытий в дальнейшем будем пренебрегать.

К внешним секциям электродов возбуждителя, занимающих области  $[\phi_0; \theta_0]$ ,  $[-\phi_0; -\theta_0]$  ( $\phi_0$ ,  $\theta_0$  – угловые координаты разрезов электрода), подводится электрическое напряжение  $Q(t)$  (рис. 1.)

Подводимый электрический сигнал возбуждает в этой части преобразователя электриче-

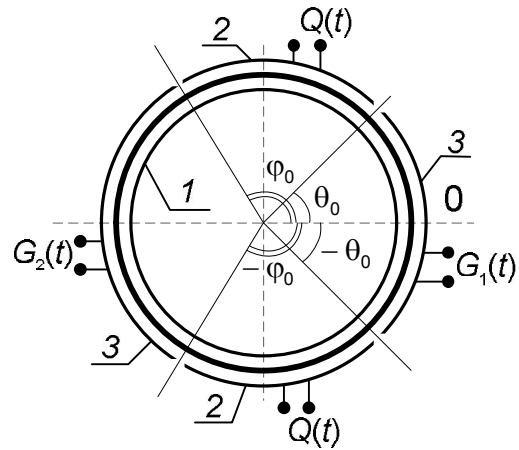


Рис. 1. Расположение электродов на цилиндрическом пьезокерамическом трансформаторе (вид сверху): 1 – внутренний электрод заземления; 2 – возбуждительные электроды; 3 – генераторные электроды

ское поле с напряженностью на серединной поверхности [4]

$$E(t) = -\frac{Q(t)}{h}. \quad (5)$$

Будем считать, что электроды генераторов шириной  $2\theta_0$  и  $2\phi_0$  подключены к электронным устройствам с бесконечно большим (несколько десятков мегом) входным сопротивлением (режим «холостого хода»). Тогда для этих областей преобразователя выполняется условие по электрическому полю для разомкнутых электродов, обеспечивающее равенство нулю тока смещения через эти поверхности цилиндрической оболочки:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \int_{-\theta_0}^{\theta_0} D d\theta = 0; \\ \frac{\partial}{\partial t} \int_{-\phi_0}^{\phi_0} D d\theta = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Уравнения (3)–(6) полностью описывают математическую постановку задачи.

Следует отметить, что выражения (6) являются электрическими граничными условиями на генераторных электродах, а задаваемое напряжение  $Q$  – электрическим граничным условием на электроде возбуждителя [4].

### Решение задачи

Рассмотрим динамический процесс установившийся во времени, т. е. зависимость от времени интересующих физических величин задается в виде  $e^{i\omega t}$  (где  $\omega$  – радиальная частота).

Представим перемещения  $w$ ,  $u$  в виде рядов, разложив их по собственным формам колебаний оболочки:

$$\begin{aligned} w(\theta, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} w_n \cos n\theta e^{i\omega t}; \\ u(\theta, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} u_n \sin n\theta e^{i\omega t}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $w_n$ ,  $u_n$  – неизвестные коэффициенты разложений, которые необходимо определить.

Подставив выбранные разложения (7), с заменой в них индекса суммирования  $n$  на  $m$ , в первое выражение электрических граничных условий (6), получим

$$\frac{\partial}{\partial t} e^{i\omega t} \times \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \left( \sum_{m=1}^{\infty} m u_m \cos m\theta + \sum_{m=0}^{\infty} w_m \cos m\theta + \frac{1}{\varepsilon} E \right) d\theta = 0,$$

или

$$\sum_{m=1}^{\infty} u_m \sin m\theta_0 + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{w_m}{m} \sin m\theta_0 + \frac{\theta_0}{\varepsilon} E = 0. \quad (8)$$

Запишем второе слагаемое выражения (8) в виде

$$\sum_{m=0}^{\infty} \frac{w_m}{m} \sin m\theta_0 = w_0 \theta_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{w_m}{m} \sin m\theta_0.$$

Тогда выражение (8) примет вид

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{\infty} u_m \sin m\theta_0 + w_0 \theta_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{w_m}{m} \sin m\theta_0 + \\ + \frac{\theta_0}{\varepsilon} E = 0. \end{aligned}$$

Решим это уравнение относительно  $E$ :

$$E = -\varepsilon \left[ w_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m\theta_0}{m\theta_0} (w_m + m u_m) \right]. \quad (9)$$

Электрическую напряженность (9) для секции генератора, где  $-\theta_0 \leq \theta \leq \theta_0$ , можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} E = -\varepsilon \left[ w_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m\theta_0}{m\theta_0} (w_m + m u_m) \right] \times \\ \times H(\theta_0 - |\theta|), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $H(\theta_0 - |\theta|)$  – функция Хевисайда, которая принимает значение единицы для области, где электроды разомкнуты ( $-\theta_0 \leq \theta \leq \theta_0$ ), и нулевые значения – для оставшейся части оболочки.

Поступая аналогичным образом для секции генератора, где  $-\phi_0 \leq \theta \leq \phi_0$ , представим элек-

трическую напряженность поля в виде

$$E = -\varepsilon \left[ w_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m\phi_0}{m\phi_0} (w_m + m u_m) \right] H(|\theta| - \phi_0), \quad (11)$$

а для той части преобразователя (возбудителя), к которой подводится электрическое напряжение  $Q(t)$ , с привлечением функции Хевисайда – в виде

$$E(t) = -\frac{Q(t)}{h} H[|\phi_0 - \theta_0| - |\phi_0 + \theta_0 - 2|\theta||]. \quad (12)$$

Объединяя выражения (10)–(12), электрическую напряженность поля в произвольной точке серединной поверхности преобразователя можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} E = -\varepsilon \left[ w_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m\theta_0}{m\theta_0} (w_m + m u_m) \right] H(\theta_0 - |\theta|) - \\ - \varepsilon \left[ w_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m\phi_0}{m\phi_0} (w_m + m u_m) \right] H(|\theta| - \phi_0) - \\ - \frac{Q(t)}{h} H[|\phi_0 - \theta_0| - |\phi_0 + \theta_0 - 2|\theta||]. \end{aligned} \quad (13)$$

Представим напряженность  $E$  в виде ряда Фурье

$$E = \sum_{n=0}^{\infty} E_n \cos n\theta e^{i\omega t}. \quad (14)$$

Тогда с учетом формулы (13), составляющие напряженности  $E_n$  определяются как

$$E_n = -\eta_n \sum_{m=0}^{\infty} \lambda_{n,m} (w_m + m u_m) - \xi_n \frac{Q}{h}, \quad (15)$$

где постоянные коэффициенты, входящие в уравнение (15), находятся по следующим формулам:

$$\eta_n = \begin{cases} \frac{\theta_0}{\pi}, & n = 0; \\ \frac{2 \sin n\theta_0}{n\pi}, & n > 0; \end{cases}$$

$$\lambda_{n,m} = \lambda_m + \frac{\beta_n}{\eta_n} \mu_m;$$

$$\xi_n = \begin{cases} \frac{\phi_0 - \theta_0}{\pi}, & n = 0; \\ \frac{2(\sin n\phi_0 - \sin n\theta_0)}{n\pi}, & n > 0; \end{cases}$$

$$\lambda_m = \begin{cases} \varepsilon, & m = 0; \\ \varepsilon \frac{\sin m\theta_0}{m\theta_0}, & m > 0; \end{cases}$$

$$\beta_n = \begin{cases} 1 - \frac{\phi_0}{\pi}, & n = 0; \\ -\frac{2 \sin n \phi_0}{n \pi}, & n > 0; \end{cases}$$

$$\mu_m = \begin{cases} \varepsilon, & m = 0; \\ \varepsilon \frac{\sin m \phi_0}{m \phi_0}, & m > 0. \end{cases}$$

Укажем значения, которые принимает коэффициент  $\lambda_{n,m}$  при различных параметрах  $n$  и  $m$ :

$$\lambda_{0,0} = \varepsilon \left( 1 + \frac{\pi - \phi_0}{\theta_0} \right) \quad (m = 0, n = 0);$$

$$\lambda_{0,m} = \varepsilon \left[ \frac{\sin m \theta_0}{m \theta_0} + \frac{\pi - \phi_0}{\theta_0} \frac{\sin m \phi_0}{m \phi_0} \right] \quad (m > 0, n = 0);$$

$$\lambda_{n,0} = \varepsilon \left( 1 - \frac{\sin n \phi_0}{\sin n \theta_0} \right) \quad (m = 0, n > 0);$$

$$\lambda_{n,m} = \varepsilon \left[ \frac{\sin m \theta_0}{m \theta_0} - \frac{\sin n \phi_0}{n \theta_0} \frac{\sin m \phi_0}{m \phi_0} \right] \quad (n > 0, m > 0).$$

Подставим выражения (7) и (14) в систему уравнений движения оболочки (3):

$$\begin{cases} (1 + \delta) n^2 u_n + n w_n + \delta n^3 w_n - \nu n E_n = \omega^2 u_n; \\ n u_n + \delta n^3 u_n + w_n + \delta n^4 w_n - \nu E_n = \omega^2 w_n. \end{cases} \quad (16)$$

Умножив второе уравнение системы (16) на  $n$  и вычтя из него первое, получим:

$$n[\delta n^2(n^2 - 1) - \omega^2] w_n + [\delta n^2(n^2 - 1) + \omega^2] u_n = 0.$$

Решение полученного уравнения относительно  $u_n$  имеет вид

$$u_n = \frac{n(\omega^2 - \chi_{n1})}{\omega^2 - \chi_{n1}} w_n, \quad (17)$$

где  $\chi_{n1} = \delta n^2(n^2 - 1)$ .

Подставляя выражение (17) в первое уравнение системы (16), с учетом выражения для составляющих напряженности  $E_n$  (15) получим:

$$\frac{\omega^4 - \chi_{n3} \omega^2 + \chi_{n4}}{\omega^2 + \chi_{n1}} w_n - \nu \eta_n \sum_{m=0}^{\infty} \lambda_{n,m} \frac{\chi_{m2} \omega^2 - \chi_{m4}}{\omega^2 + \chi_{m1}} w_m = \nu \xi_n \frac{Q}{h},$$

где  $\chi_{n3} = (1 + \delta n^2) \chi_{n2}$ ;  $\chi_{n2} = (1 + n^2)$ ;  $\chi_{n4} = (n^2 - 1) \chi_{n1}$ ;  $\chi_{m2} = (1 + m^2)$ ;  $\chi_{m4} = (m^2 - 1) \chi_{m1}$ ;  $\chi_{m1} = \delta m^2(m^2 - 1)$ .

Обозначив

$$\Omega_n = \frac{\omega^4 - \chi_{n3} \omega^2 + \chi_{n4}}{\omega^2 + \chi_{n1}}$$

и

$$\Psi_m = \frac{\chi_{m2} \omega^2 - \chi_{m4}}{\omega^2 + \chi_{m1}},$$

выражение для отыскания  $w_n$  запишем следующим образом:

$$\Omega_n w_n - \nu \eta_n \sum_{m=0}^{\infty} \lambda_{n,m} \Psi_m w_m = \nu \xi_n \frac{Q}{h} \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (18)$$

Далее, по вычисленным значениям  $w_n$ ,  $u_n$  (для этого привлекаются выражения (17), (18)), находятся амплитуды электрических напряжений  $G_1$ ,  $G_2$  на электродах генераторов. Для этого необходимо воспользоваться первыми двумя слагаемыми в формуле (13), умножив их на  $h$  и на безразмерную (отнесенную к  $R$ ) высоту  $L$  пьезотрансформатора:

$$G_1 = \varepsilon h L \left[ w_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m \theta_0}{m \theta_0} (w_m + \mu u_m) \right],$$

$$G_2 = \varepsilon h L \left[ w_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m \phi_0}{m \phi_0} (w_m + \mu u_m) \right].$$

Нахождением амплитуд  $G_1$ ,  $G_2$  напряжений на генераторных электродах пьезоэлектрического цилиндрического трансформатора заканчивается решение поставленной задачи.

## Выводы

1. В работе выполнено математическое моделирование работы цилиндрического пьезоэлектрического трансформатора с двумя секциями генераторных электродов. Получены выражения, позволяющие рассчитать прогибы и тангенциальные смещения оболочки, электрическую напряженность керамики, а также электрическое напряжение, возникающее на генераторных электродах пьезотрансформатора.

2. При решении задачи использовались: линейная теория электроупругих оболочек, базирующаяся на гипотезах Кирхгофа-Лява; разложение искомых величин по собственным формам колебаний оболочки; разложение кусочно-непрерывных функций в ряды Фурье.

3. Анализ приведенных выражений позволяет сделать вывод о том, что решение поставленной задачи не удается разбить на ряд независимых решений для каждой из форм колебаний (формы колебаний «замешиваются»), что несколько усложняет выполнение расчетов,

особенно вычисление прогибов, которые находятся из системы алгебраических уравнений (18) с привлечением метода редукции.

### Литература

1. *Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В.* Пьезокерамические преобразователи физических величин. – Черкассы: ЧГТУ, 2005. – 631 с.
2. *Лавриненко В.В.* Пьезокерамические трансформаторы. – М.: «Энергия», 1975. – 112 с.
3. *Трофимов А.И.* Пьезокерамические преобразователи статических нагрузок. – М.: Машиностроение, 1979. – 95 с.
4. *Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А.* Механика связанных полей в элементах конструкций. – К.: Наук. думка, 1989. – Т. 5: Электроупругость. – 280 с.
5. *Шульга Н.А., Болкисев А.М.* Колебания пьезоэлектрических тел. – К.: Наук. думка, 1990. – 228 с.
6. *Шульга Н.А., Карлаш В.Л.* Резонансні електромеханічні коливання п'єзоелектричних пластин. – К.: Наук. думка. – 2008. – 270 с.
7. *Морзун И.О.* Математическое моделирование работы цилиндрического пьезокерамического трансформатора // *Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии».* – 2010. – №2 (55). – С. 204–207.
8. *Дідковський В.С., Лейко О.Г., Савін В.Г.* Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання). – Кіровоград: «Імекс-ЛТД». – 2006. – 448 с.

<sup>1</sup> *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

<sup>2</sup> *Черкасский государственный технологический университет*

*Поступила в редакцию 12 февраля 2009 г.*

УДК 534.3

А.В. Коржик, канд. техн. наук

## Пространственная избирательность многомодовых электроупругих цилиндрических систем

В рамках метода сквозной задачи определено перспективное направление исследований пространственных свойств приемо-излучающих антенных систем на основе многомодовых цилиндрических преобразователей, представленных электроупругими цилиндрическими круговыми оболочками, погруженными в идеальную жидкость. При этом обеспечивается возможность видоизменения характеристик направленности одиночных преобразователей и антенн, построенных на их основе, в широком частотном диапазоне как с применением волновых методов, так и путем реализации свойств умеренной сверхнаправленности указанных преобразователей и антенн.

In a boundaries of hydro – electroelastic tasks the perspective research of directional properties many-modes electroelastic systems was showed. The solution of this task to give a chance for the regulating the directional characteristics this transducers system by traditional waves methods and methods of superdirective antennas, with put together properties coupled modes many-modes electroelastic cylindrical transducers.

**Ключевые слова:** гидроакустические средства, электроупругость, направленность, сверхнаправленность, цилиндрический преобразователь, моды, разрезные электроды, нагрузка, электрическая нагрузка, давление, электрическое поле, характеристика направленности.

### Введение

В современной гидроакустике задачи о создании пространственной избирательности приемо-излучающих систем развиваются весьма динамично, что связано с постоянно возрастающими требованиями к гидроакустическим средствам в части обеспечения большей дальности действия, расширения частотного диапазона, увеличения рабочих глубин и решения задач комплексации при уменьшении массогабаритных характеристик как аппаратной составляющей, так и приемо-излучающих преобразующих систем.

Это направление предполагает изменение расстановки акцентов при проектировании гидроакустических средств, что связывается либо с

усилением роли обрабатывающего ядра и решения проблемы интегрирования аппаратной части гидроакустических средств в бортовые системы носителей, либо с совершенствованием автономных аппаратных устройств, либо с повышением роли антенных и преобразующих систем. Безусловно, не исключается ситуация развития указанных направлений параллельно.

При этом основными предпосылками повышения роли антенно-преобразующей составляющей являются:

- тенденция к расширению частотного диапазона, вообще, и к смещению рабочих характеристик в низкочастотную область, в частности;
  - необходимость снижения или, по крайней мере, сохранения массогабаритных характеристик антенн и преобразователей при изменении частотного рабочего диапазона;
  - необходимость видоизменения пространственных характеристик антенн и преобразователей и управления ими в разных частотных диапазонах с целью получения требуемых параметров характеристик направленности;
  - использование протяженных кабельных линий при подключении забортовых устройств;
  - увеличение диапазона рабочих глубин и при этом учет снижения роли экранирующих элементов, используемых при формировании однонаправленных пространственных характеристик;
  - методическое и метрологическое обеспечение акустической составляющей проблемы комплексации гидроакустических средств в части использования одного общего забортного устройства для решения различных задач в среде интегрированной аппаратной составляющей.
- Все это и обуславливает цель предлагаемой работы, которая заключается в расширении применимости метода сквозной задачи на исследования пространственных свойств антенных систем, созданных на основе многомодовых цилиндрических преобразователей, основываясь на изучении особенностей процессов излучения и приема звуковых волн электроупругими цилиндрическими круговыми оболочками, погруженными в идеальную жидкость.

## 1. Развитие подходов к определению пространственных свойств акустических антенн

В настоящее время существует большое количество разнообразных классов акустических антенн [1], каждый из которых обеспечен аналитической базой в части решения задач анализа и синтеза (например, работы [1–8]). При этом модели, используемые для описания звуковых полей акустических антенн, в большинстве своем базируются на использовании приближений для дальнего поля и на допущении о звукопрозрачности таких систем [1–4, 6–8]. Заметим, что указанные допущения не распространяются на фокусирующие антенны [3, 5].

Отметим также, что приближение идеологии постановки и построения расчетных схем задач о направленности к реальным условиям работы акустических антенн развивалось параллельно с развитием самой антенной техники по мере ее усложнения. Так, первоначально, достаточно широкое развитие получили интегральные методы в формульных представлениях Кирхгофа [9,10], Гюйгенса [10] и Грина [9,11]. Однако в силу сложности аналитических и расчетных представлений, а также трудностей, связанных с определением вида функций Грина для поверхностей антенн многих классов, указанные методы в инженерной практике использованы мало, остаются в большей степени базовыми и в основном применяются для решения концептуальных научных задач.

В дальнейшем, приближение постановок задач к реальным условиям работы гидроакустических антенн проводилось путем введения ситуации акустического взаимодействия элементов антенны между собой. Учет такого взаимодействия реализован при решении задач синтеза антенн лишь к середине 80-х – началу 90-х годов XX столетия. Причем вопросы акустического взаимодействия элементов антенн между собой в режимах излучения и приема исторически связывались с взаимным сопротивлением излучения элементов [1, 2] и приобрели более широкое толкование в работах [10, 12, 13]. К этому можно отнести привлечение в качестве предмета анализа – структуры рассеянных и полных полей систем приемных и излучающих преобразователей. Поэтому вопросы проектирования отечественных антенных систем на рубеже XX–XXI веков представляются хорошо освещенными лишь в традиционных постановках задач приема и излучения звука [1–7] с дополнениями в части рассмотрения эффектов взаимодействия элементов антенны между собой по

акустическому полю [10, 12, 13]. Следует также отметить, что если в высокочастотном диапазоне практический интерес к формированию пространственных качеств антенных систем мог быть удовлетворен за счет использования, в основном, геометрии и волновых свойств антенн и преобразователей, то для средне- и низкочастотного диапазона (в силу неизбежного увеличения массо-габаритных характеристик антенн) многообещающим представлялось направление, связанное с проблемой использования векторных и комбинированных преобразователей–приемников. При этом удавалось сохранить габариты антенн, но требовались исследования и разработка, собственно, приемников, реагирующих как на скалярные, так и на векторные характеристики акустического поля. В обеспечении векторно-фазовых методов в основном исследовались приемники колебательной скорости, градиента давления и смещения [14, 15].

Еще одно направление развития акустических антенных систем для низкочастотной области, обозначилось благодаря явлению так называемой «сверхнаправленности» [16–18], определяющее возможность антенны иметь более высокие направленные качества при проведении некоторых аддитивных операций в ее трактах без изменения габаритов и конфигурации. Отметим, что общие соображения о возможности концентрации энергии точечного источника в любом сколь угодно малом телесном угле высказаны еще в 1922 г. Озеном.

Терминологически [19, 20], понятие «сверхнаправленность» заимствовано из теории синтеза радиоантенн [21–25]. Привлечение идеологии классической сверхнаправленности к задачам акустики относится к 60-м – 70-м годам прошлого столетия [28, 29] и в дальнейшем для корабельных систем широкого применения не нашло. Это обусловлено рядом причин, например, такими как значительная чувствительность сверхнаправленной антенны к неточностям выполнения аддитивных операций в части внесения амплитудно-фазовых распределений [24, 25–27] и высокая степень подверженности акустических антенн эффектам взаимодействия элементов антенны по акустическому полю [28].

Физические основы работы сверхнаправленных антенн, векторных приемников и непосредственно результаты проектирования гидроакустических систем телеметрии на их основе, представлены в литературе весьма широко: от научно-теоретических аспектов электроакустики [26, 27] и гидроакустики [28, 29] до техни-



ческой реализации векторных и комбинированных приемников [30, 31].

Гидроакустические преобразователи, как структурные элементы приемо–излучающих гидроакустических антенн, заслуживают отдельного исследования их пространственно–энергетических свойств. При этом в задачах анализа и синтеза акустических антенн [1, 2, 6] в рамках существующих представлений о методах и подходах к проектированию электроакустических преобразователей, необходимо упомянуть об общей проблеме для антенн всех классов, состоящей в невозможности точного учета граничных условий на поверхностях преобразователей, взаимодействующих в составе антенны. Неточности, возникающие при этом, очевидно, приводят к искажению результатов проектирования в части пространственно–энергетических характеристик как преобразователей, так, соответственно, и антенн на их основе.

Основными литературными источниками, в которых изложены традиционные подходы к проектированию гидроакустических преобразователей, являются работы [7, 8, 32–34], а также некоторые материалы [35–37], выполненные в рамках проведения научно–исследовательских и опытно–конструкторских работ на ведущих профильных предприятиях. Для устранения или (по крайней мере) снижения возникающих в указанных источниках неточностей и неизбежных упрощений представляется целесообразным переход от граничных условий на поверхности преобразователя (одиночного или нескольких) к условиям сопряжения, с помощью которых должны быть учтены эффекты взаимовлияния преобразователей по акустическому полю как показано, например, в работах [13, 34, 37].

Кроме того, учет эффектов дифракционного взаимодействия для многоэлементных антенн, а также условия использования в конструкции антенн элементов экранировки, очень часто приводят к существенным изменениям характера сопротивления излучения преобразователей [38–43]. Поэтому применение условий сопряжения обеспечивает возможности учета сложного характера распределения возмущений по поверхности приемных или излучающих преобразователей, образующих совместно с остальными конструктивными элементами (экранами, несущими конструкциями, устройствами гидродинамической защиты и т. д.), собственно, акустическую антенну. При этом замена граничных условий условиями сопряжения предпочтительнее еще и в смысле исследования характери-

стик антенн в широком частотном диапазоне для каждого приведенного в работах [1, 2] класса.

В связи с изложенным выше отметим, что в любой задаче о пространственной избирательности приемных и излучающих систем первоначально предметом рассмотрения должен быть, собственно, некий обратимый гидроакустический преобразователь оговоренных и неизменных размеров, позволяющий видоизменять свои пространственные характеристики в широком диапазоне частот. При этом их изменение должно происходить не только за счет изменения волновых соотношений задачи, но и за счет изменения характера и параметров колебаний (режимы приема и излучения), а также вида физического поля, на которое этот преобразователь должен реагировать (случай режима приема). Одними из наиболее перспективных в этом смысле являются пьезокерамические цилиндрические преобразователи, на поверхность которых нанесены разрезные электроды, обеспечивающие возможность подачи (съема) электрического сигнала в режиме излучения (приема). В связи с развитием технологии изготовления пьезокерамических элементов в последние годы широкое распространение получил типовой ряд кольцевых круговых цилиндрических пьезокерамических преобразователей, выполненных в виде сплошной тонкостенной конструкции с радиальной поляризацией [44, 45]. Соосные наборы таких колец дают возможность получать преобразователи с образующей требуемой протяженности, а также компоновать антенны на их основе [36, 37].

Предложенная цилиндрическая колебательная система является многомодовой. Причем каждая мода (собственная форма) колебаний характеризуется своими пространственно–энергетическими свойствами [7, 8, 11, 32–34, 46–49]. Таким образом, практический интерес представляют высокотехнологичные [34, 44–48] круговые тонкостенные цилиндрические преобразователи [32, 33], характеризующиеся высоким энергетическим потенциалом, способные эффективно работать в режимах приема и излучения, и позволяющие в широких частотных диапазонах, условиях работы и при разнообразных видах включения реагировать на различные физические параметры акустического поля. Это и определило использование преобразователей такого типа во многих гидроакустических приборах и устройствах [6, 13, 48].

Предпочтительное отношение к использованию круговых цилиндрических гидроакустических преобразователей указанного типа объяс-

няется еще и тем, что модовая структура акустического поля такого преобразователя весьма самобытна, а пространственная избирательность обеспечивается весомостью использования частного решения уравнения Гельмгольца по угловой координате как члена разложений бесконечного ряда для акустического поля вида  $\cos(n\varphi)$ , где  $n$  – номер моды (собственной формы колебаний) [11, 49], а  $\varphi$  – угловая координата, изменяющаяся в пределах  $(0; 2\pi)$ .

Акустические антенны на основе таких преобразователей, очевидно, могут быть исследованы с использованием особенностей взаимодействия по акустическому полю, указанных условий сопряжения и общих соотношений для направленности акустических антенн.

Оценку пространственных свойств преобразователей указанного типа и антенных систем на их основе представляется целесообразным производить по результатам решения задач так называемого «сквозного типа» как для режима излучения, так и для режима приема. Сквозные задачи о приеме и излучении звуковых волн относятся к классу задач гидроэластостатики и в настоящее время представлены весьма широко в работах многих авторов, например, работы [34, 37–40, 50–54, 56–62]. Тем не менее, в рамках теории гидроэластостатики вопросы о возбуждении пьезоэлектрических преобразователей электрически или акустически в нестационарном и стационарном режимах работы в большинстве своем рассмотрены лишь для пьезоэлектрических преобразователей с полностью электродированными поверхностями (например, работы [34, 38, 50–52, 54, 56]).

Для управления пространственными свойствами цилиндрических преобразователей необходима многоэлектродность, которая и позволяет использовать влияния мод низших и высших порядков на пространственные характеристики преобразователей [31, 32, 46] и антенн на их основе [15, 22, 25]. При этом случаи применения излучающих сферических и цилиндрических преобразователей со сплошными электродами и электродами в виде секций исследованы лишь в нестационарной постановке для режимов приема и излучения и упрощенных видов сигналов возбуждения [52, 60–62]. Известно также [34, 45, 52, 58, 59, 61], что применение электродов в виде секций, частично покрывающих поверхность преобразователя, приводит к обогащению модовой структуры создаваемого акустических и электрических полей за счет использования высших форм колебаний поверхности и особенностей коммутации секций

электродов. В связи с этим наблюдается своеобразная аналогия получения характеристик направленности цилиндрических преобразователей путем введения аддитивных операций в виде амплитудно-фазового весового суммирования [17, 63–66] и методов получения умеренной сверхнаправленности в антенных решетках [17, 19, 24, 25].

Кроме этого, реальные условия работы большинства гидроакустических преобразователей предполагают использование протяженных кабельных соединений. Такая ситуация приводит к необходимости учета параметров длинных кабельных линий применительно к задаваемому режиму работы линии по входу и выходу для режимов приема и излучения [53, 58–60].

## **2. Исходные данные, общее решение и основные результаты сквозной задачи приема**

Предлагается размещение в идеальной жидкости набора пьезоэлектрических круговых бесконечно длинных многомодовых цилиндрических преобразователей. Преобразователи представлены пьезоэлектрическими цилиндрическими круговыми оболочками с разрезными электродами, которые могут быть подключены либо к выходам задающих генераторов (режим излучения) либо к входам устройств суммирования (режим приема) через однородные электрические линии с распределенными параметрами. При этом обеспечивается также оценка возможности видоизменения характеристик направленности одиночных преобразователей и антенн на их основе в широком частотном диапазоне как с применением волновых методов, так и путем изменения оцениваемого скалярного параметра поля на векторный с использованием аддитивных операций обработки. Заметим, что по своей сути отличие давлений, определяемых на поверхностях рассматриваемых электродов, обеспечивает возможность оценки рассматриваемого преобразователя как приемника градиента давления, что позволяет говорить об умеренной сверхнаправленности такого устройства.

Основные положения постановки сквозной задачи приема для указанной ситуации приведены в работах [55, 57]. Решение задачи и основные результаты в части определения параметров основных взаимодействующих физических полей приведены в работах [63–70].

В качестве основных результатов данной работы предлагаются полученные предложенным «сквозным» методом характеристики на-

правленности одиночного преобразователя в виде соосного набора цилиндрических колец с разрезными электродами и системы цилиндрических преобразователей в виде двухэлементной решетки на их основе. Система рассмотрена в широком диапазоне частот при внесении амплитудно-фазовых распределений чувствительности элементов и использовании модовых свойств предложенных преобразователей. Характеристики направленности (ХН) приведены на рис. 1–6 для условий использования кольцевых преобразователей, выполненных из пьезокерамического материала ЦТБС-3 с диаметрами 135 мм, высотой 30 мм и толщиной 6 мм для значений частот  $f = 500; 4000; 8200; 11600$  Гц и значения расстояний между фазовыми центрами пары преобразователей  $d = 141$  мм. При этом ХН системы в виде пары определялась из известного [1] соотношения:

$$R_0(\varphi) = \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin(\varphi)\right),$$

где  $\lambda$  – длина волны.

Как видно из полученных результатов, направленные свойства системы, приобретенные с использованием многомодовости преобразователей, существенно выше во всем рассматриваемом частотном диапазоне. Так, даже для области нижних частот (рис. 1–3) изменения ХН пары незначительны, в то время как ХН многомодовой системы видоизменяется от формы вида  $\cos(\varphi)$  до кардиоидной и даже практически квадрупольной. С дальнейшим ростом частоты многомодовость приводит к возможности получения ХН с малым числом и уровнем боковых лепестков (рис. 4), а также практически однонаправленных характеристик (рис. 5, 6)

Пространственная избирательность преобразователей рассматриваемой многомодовой системы обеспечивается за счет электромеханической активации мод от нулевой до третьей с использованием коммутации электродов соответствующих преобразователей, амплитудной коррекции чувствительности соответствующего кольцевого элемента преобразователя в рассматриваемом диапазоне частот, а также регулировки фазы электрических сигналов по выходу задающих устройств или снимаемых с электрических нагрузок преобразователей.

Характеристики получены путем внесения смещений фазы для обеспечения сфазированности электрических сигналов, соответствующих реализации мод высших порядков с нулевой модой каждого из преобразователей. При

этом коммутация электродов каждого из четырех преобразователей выполнена так, чтобы с учетом связанности колебаний доминировала нулевая, первая, вторая или третья моды. Безусловно, достижение наибольшего эффекта с точки зрения реализации эффективности

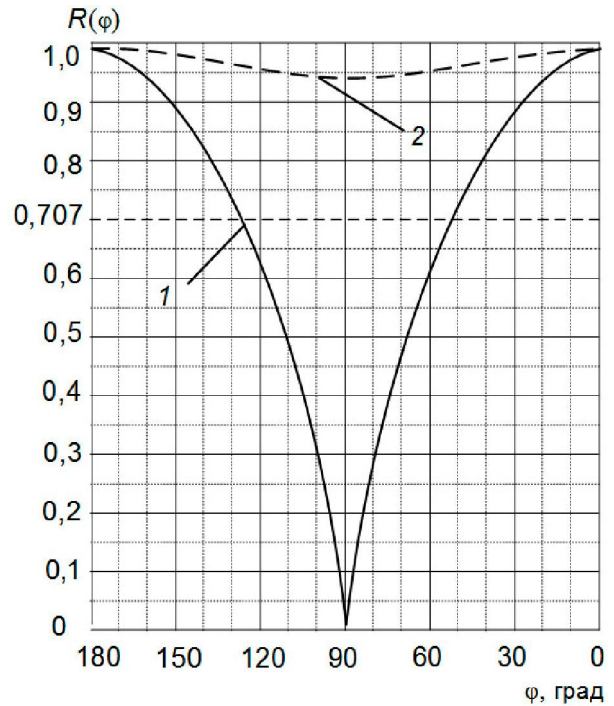


Рис. 1.  $R = 500$  Гц; 1 – реализация первой моды  $R(\varphi) = \cos(\alpha)$ ; 2 – ХН дискретной двухэлементной антенны

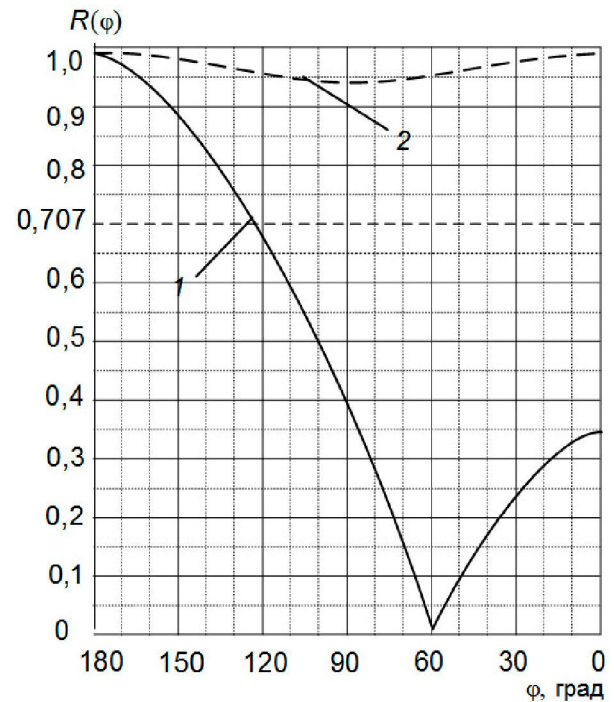


Рис. 2.  $f = 500$  Гц; 1 – ХН вида  $R(\varphi) = \frac{1+2\cos(\varphi)}{3} \times R_0(\varphi)$ ; 2 – ХН дискретной двухэлементной антенны

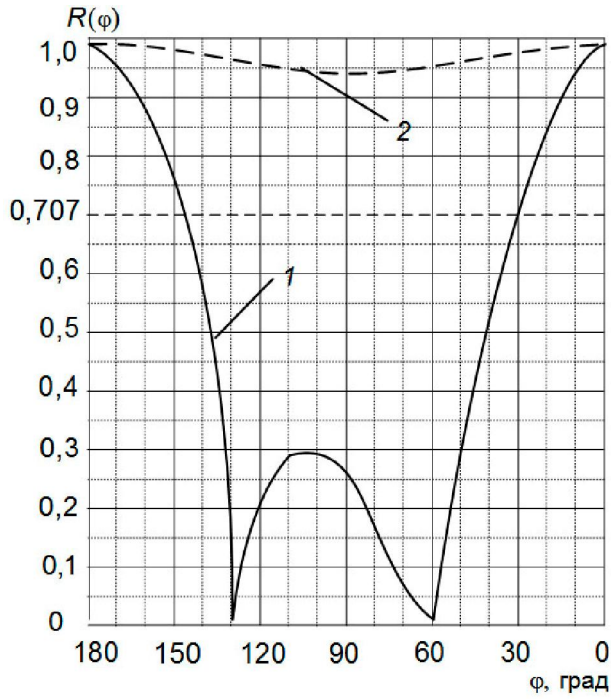


Рис. 3.  $f = 500$  Гц; 1 – ХН вида  $R(\varphi) = \frac{1 + 2\cos(\varphi)}{3} \times R_0(\varphi)$ ; 2 – ХН дискретной двухэлементной антенны

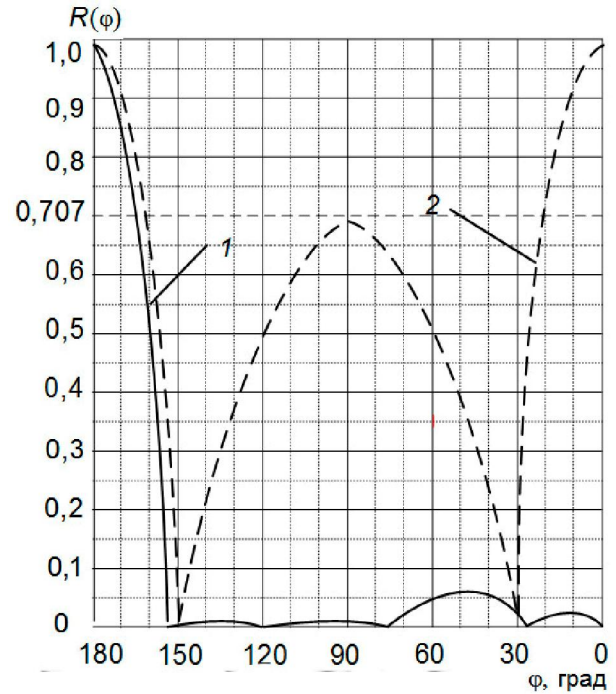


Рис. 4.  $f = 4000$  Гц; 1 – ХН вида  $R(\varphi) = \frac{1 + \cos(\varphi) + \cos(2\varphi) + \cos(3\varphi)}{4} R_0(\varphi)$ ; 2 – ХН дискретной двухэлементной антенны

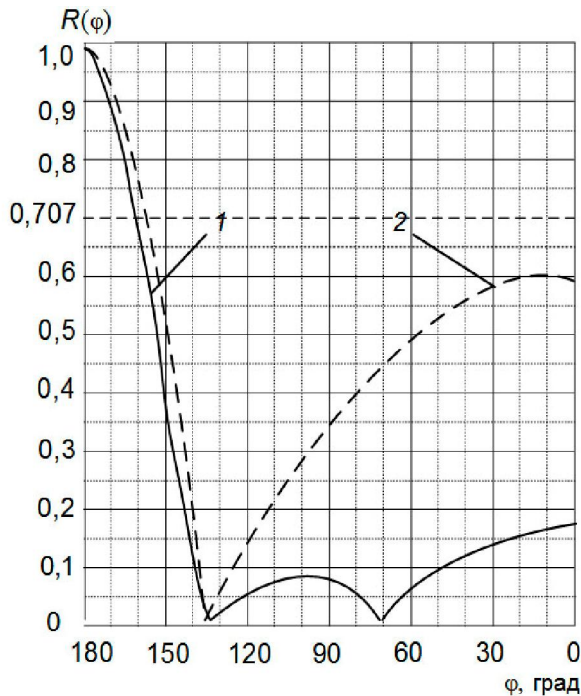


Рис. 5.  $f = 8200$  Гц; 1 – ХН вида  $R(\varphi) = \frac{1 + 2\cos(\varphi)}{3} \times R_0(\varphi)$ ; 2 – ХН дискретной двухэлементной антенны

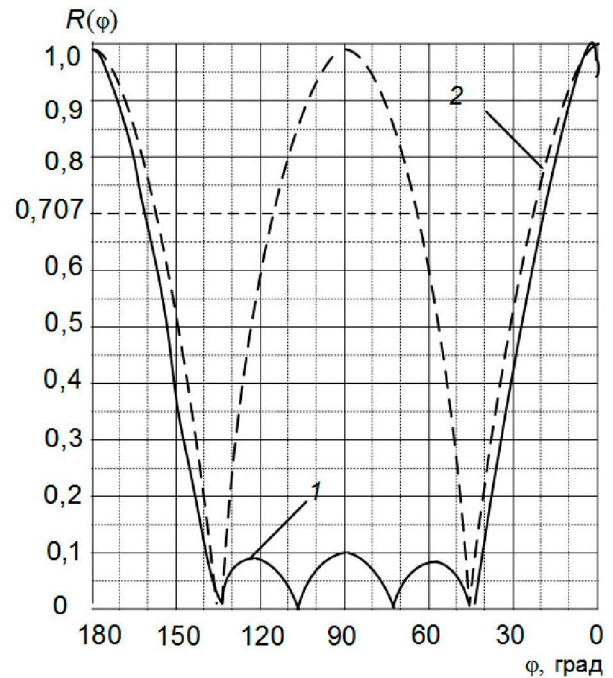


Рис. 6.  $f = 11600$  Гц; 1 – ХН вида  $R(\varphi) = \frac{1 + 2\cos(\varphi)}{3} \times R_0(\varphi)$ ; 2 – ХН дискретной двухэлементной антенны

той или иной моды, возможно лишь при работе на частоте ее резонанса. Поэтому получение результатов рис. 1–6 возможно лишь при выравнивании амплитуд по выходу соответствующих преобразователей для каждого вида сум-

мирования – т. е. при внесении амплитудного распределения, величина которого должна выбираться в соответствии с амплитудно-частотными характеристиками преобразователей [70].

## Выводы

1. Предложенный подход к определению и синтезу характеристик направленности цилиндрических круговых пьезокерамических преобразователей позволяет получать характеристики направленности с учетом особенностей взаимных преобразований основных физических полей – акустического, механического и электрического, а также особенностей включения преобразователей через длинную кабельную линию;

2. Основной причиной сохранения направленных свойств в широком диапазоне частот является физическая природа колебательной системы, сочетающая в себе свойства связанности собственных форм колебаний и особенности электромеханической активации тех или иных форм;

3. Формирование характеристик направленности с использованием выбранной многомодовой колебательной системы позволяет:

- получать характеристики с весьма большой остротой направленного действия в широкой полосе частот;
- переходить к практически однонаправленным характеристикам, что в некоторой степени компенсирует неэффективность работы экранирующих элементов при значительных величинах внешнего статического давления;
- утверждать (в силу родственности операций аддитивного характера), что подобным акустическим антеннам свойственна умеренная сверхнаправленность.

Процесс управления формой амплитудных характеристик направленности требует проведения операций предварительной индивидуальной фазировки и амплитудной коррекции чувствительности преобразователей, как для одиночных преобразователей, так и для антенных систем, построенных на их основе.

## Литература

1. *Смарышев М.Д.* Направленность гидроакустических антенн. – Л.: Судостроение, 1973. – 270 с.
2. *Смарышев М.Д., Добровольский Ю.Ю.* Справочник по расчету направленных свойств гидроакустических антенн. – Л.: Судостроение, 1984. – 304 с.
3. *Габидулин Г.С., Тюрин А.М., Нестеренко В.И.* Антенные устройства гидроакустических средств и их элементы. – Л.: ВМА, 1982. – 364 с.
4. *Евтютов А.П., Митько В.Б., Инженерные* расчеты в гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1988. – 340 с.
5. *Домаркас В.Й., Пилецкас Э.Л.* Ультразвуковая эхоскопия. – Л.: Машиностроение, 1988. – 340 с.
6. *Орлов Л.В., Шабров А.А.* Гидроакустическая аппаратура рыболовецкого флота. – Л.: Судостроение, 1987. – 222 с.
7. *Свердлин Г.М.* Гидроакустические преобразователи и антенны. – Л.: Судостроение, 1988. – 200 с.
8. *Свердлин Г.М.* Прикладная гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1990. – 320 с.
9. *Скучик Е.* Основы акустики: В 2 т. – М.: Мир, 1976. – Т.1. – 520 с.; Т.2. – 542 с.
10. *Шендеров Е.Л.* Волновые задачи гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1972. – 352 с.
11. *Лепендин Л.Ф.* Акустика. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
12. *Гринченко В.Т., Вовк И.В.* Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках. – К.: Наукова думка, 1986. – 240 с.
13. *Лейко А.Г., Шамарин Ю.Е., Ткаченко В.П.* Подводная электроакустическая аппаратура и устройства: В 2 т. – К.: ГКППУ ГНИИ ГП, 2000. – Т.1: Подводные акустические антенны. Методы расчета звуковых полей. – 320 с.
14. *Гордиенко В.А., Ильичев В.И., Захаров Л.И.* Векторно-фазовые методы в акустике. – М.: наука, 1989. – 220 с.
15. *Скребнев Г.К.* Гидроакустические приемники градиента давления и комбинированные приемники // Судостроение за рубежом. – 1984. – № 2. – С. 79–77.
16. *Хансен Р.* Сканирующие антенные системы СВЧ. – М.: Сов. радио, 1966. – 536 с.
17. *Айзенберг Г.З.* Антенны ультракоротких волн. – М.: Связь, 1967. – 348 с.
18. *Пистолькорс А.А.* Антенны. – М.: Связьиздат, 1947. – 480 с.
19. Терминологический словарь – справочник по гидроакустике / Р.Х. Бальян, Э.В. Батанов, А.В. Богородский и др. – Л.: Судостроение, 1989. – 368 с.
20. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник: Навч. посібник / За ред. Ю.Л. Мазора, Є.А. Мачуського, В.І. Правди. – К.: Вища школа, 1999. – 838 с.
21. *Фельд Я.Н., Барах Л.Д.* Современное состояние теории синтеза антенн // Радиотехника и электроника. – 1968. – № 2. – С. 187–205.
22. *Пистолькорс А.А.* Применение функций Матье для расчета распределения тока в антенне по заданной диаграмме направленности // Доклады АН СССР. – 1958. – Т. XXXIX, № 5. – С. 121–128.



23. Хурган Я.И., Яковлев В.П. Методы теории целых функций в радиофизике, теории связи и оптике. – М.: ГИФМЛ, 1962. – 220 с.
24. Jillbert E.N. Morgan S.P. Optimum design of directive antenna arrays subject to random vibrations // Bell syst. Techn. Journ. – 1955. – Vol. 34, № 5. – P. 637.
25. Tucker D.J. The signal/noise performance of electro-acoustic strip arrays // Acoustica. – 1958. – Vol. 8, № 1. – P. 512–515.
26. Фурдудев Ф.Ф. Электроакустика. – М.–Л.: ОГИЗ Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 515 с.
27. Сапожков М.А. Электроакустика. – М.: Связь, 1978. – 272 с.
28. Маяцкий В.И. Оптимизация сверхнаправленных элементов, используемых в составе антенны–решетки // Труды предприятия Р-6292.1967. – № 1. – С. 17–33
29. Маяцкий В.И. О синтезе сверхнаправленных антенн со специальными диаграммами направленности // Вопросы специальной гидроакустики. – К.: 1967. – № 4. – С. 31–39.
30. Скребнев Г.К. Комбинированные гидроакустические преобразователи. – СПб.: Элмор, 1997. – 200 с.
31. Гордиенко В.А. Векторно–фазовые методы в акустике. – М.: Физматлит, 2007. – 480 с.
32. Подводные электроакустические преобразователи / В.В. Богородский, Е.А. Зубарев, Е.А. Корепин, В.И. Якушев – Л.: Судостроение, 1983. – 243 с.
33. Пьезокерамические преобразователи. Методы измерений и расчет параметров / Под ред. С.И. Пугачева. – Л.: Судостроение, 1984. – 256 с.
34. Дідковський В.С., Лейко О.Г., Савін В.Г. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання). – Кіровоград: «Імекс-ЛТД», 2006. – 448 с.
35. Отчет по исследованиям пространственных характеристик приборов 37–3, 27–3: Отчет о НИР «Порыв», 1 этап / НПО «Славутич». – Ц172–Э175.21. – К.,1991. – 237 с.
36. Отчет по результатам эскизного проектирования приборов 27–3, 38–3, 28–3: Отчет о ОКР «Новелла–В», Эскизный проект / НПО «Славутич». – Ц204–Э198.05. – К.,1991. – 214 с.
37. Отчет по исследованиям основных конструкторских решений приборов 37–3, 27–3: Отчет о НИР «Объединение», 1 этап / НПО «Славутич». – Ц172–Э175.21. – К.,1991. – 237 с.
38. Гринченко В.Г., Лейко А.Г. Излучение звука системами взаимодействующих пьезокерамических оболочек // Докл. IV Всесоюз. симп. по физике акустикогидродинамических явлений и оптоакустики. – Ашхабад, 1985. – С. 83–87.
39. Борисейко В.А., Гринченко В.Т., Улитко А.Ф. Соотношения электроупругости для цилиндрических оболочек вращения // Прикл. механ. – 1976. – Т.12, № 2. – С. 26–23.
40. Гринченко В.Т., Сенченко И.В. Излучение звука частично экранированными пьезокерамическими оболочками // Прикладная Механика. – 1982. – Т. 18, № 2. – С. 15–21.
41. Климов А.Е., Лейко А.Г. О влиянии взаимодействия экранированных цилиндрических преобразователей на их характеристики звукового поля в ближней зоне плоских антенн // Вопросы кораблестроения. Серия: Спец. гидроакустика. –1981. – № 37. – С. 55–63.
42. Климов А.Е., Лейко А.Г. Дифракция плоской звуковой волны на резонансном цилиндрическом преобразователе, частично покрытым звукоотражающим слоем конечной толщины // Доклады IX Всесоюзной акустической конференции (секция П). – М., 1978. – С. 33–36.
43. Глазнов В.Е. Экранирование гидроакустических антенн. – Л.: Судостроение, 1986. – 148 с.
44. ПЬЕЗОМАТЕРИАЛЫ. – <http://www.avrora-elma.ru/products.html>
45. ПРОДУКЦІЯ. – <http://www.kmt.kiev.ua/products/avrora-elma>
46. Аронов Б.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 271 с.
47. Скребнев Г.К. Комбинированные гидроакустические приемники. – СПб.: Элмор, 1997. – 200 с.
48. Лейко А.Г., Шамарин Ю.Е., Ткаченко В.П. Подводная электроакустическая аппаратура и устройства: В 2 т. – К.: ГКППУ ГНИИ ГП, 2000. – Т.2: Технология акустических антенн. Методы изготовления с применением электрофизических приемов обработки. – 256 с.
49. Гринченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. Основы акустики. – К.: Наукова думка, 2007. – 640 с.
50. Бабаев А.Э., Лейко А.Г., Савин В.Г. Акустические и механические поля радиально поляризованного цилиндрического вибратора при импульсном электрическом возбуждении // Акуст. журн. – 1989. – Т. 35, № 2. – С. 211–217.
51. Сенченко И.В. Рассеяние звука пьезокерамической цилиндрической оболочкой вблизи жесткой поверхности // Прикл. механика. – 1984. – Т. 20, № 7. – С. 111–114.
52. Бабаев А.Э., Бут Л.М., Савин В.Г. Нестационарные колебания тонкостенного цилиндрического пьезовибратора в жидкости при несимметричном электрическом возбуждении // Прикл. механика. – 1990. – Т.26. – С. 59–67.

53. Кубенко В.Д., Бабаев А.А. Влияние кабельного тракта на работу цилиндрического пьезопреобразователя в нестационарных режимах // Прикл. механики. – 1997. – Т.33, № 11. – С. 46–62.
54. Лейко А.Г., Савин В.Г., Ткаченко В.П. Взаимодействие плоской акустической волны с цилиндрической решеткой, состоящей из пьезокерамических цилиндрических преобразователей // Акустичний вісник. – 1999. – Т.2, № 2. – С. 64–72.
55. Коржик О.В., Лейко О.Г. Взаємодія плоскої акустичної хвилі з лінійною решіткою електропружних циліндричних перетворювачів // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2001. – № 4. – С. 106–114.
56. Лейко А.Г., Савин В.Г., Ткаченко В.П., Шармарин Ю.Е. Закономерности взаимодействия плоской акустической волны с цилиндрической решеткой, состоящей из пьезокерамических цилиндрических преобразователей // Акустичний вісник. – 2000. – Т.3, № 1. – С. 51–60.
57. Коржик О.В., Лейко О.Г. Врахування кабельного тракту при розв'язанні прийому звукових хвиль системами багатомодових п'єзокерамічних циліндричних перетворювачів // Електроніка і зв'язь. – 2007. – № 3(38). – С. 51–62.
58. Коржик А.В., Солтановский Ю.И. Излучение звуковых волн секционированным цилиндрическим пьезопреобразователем, подключенным к длинной линии // Электроніка і зв'язь. – 2009. – № 6(53). – С. 41–47.
59. Коржик А.В., М.И. Лесечко М.И. Излучение звуковых волн системой секционированных цилиндрических преобразователей, подключенных к длинной линии // Электроніка і зв'язь. – 2010. – № 1(54). – С. 54–59.
60. Савин В.Г., Моргунов И.О. Преобразование акустических импульсов в электрические сферической пьезокерамической оболочкой // Электроніка і зв'язь. – 2006. – № 6(35). – С. 36–42.
61. Моргунов И.О. Излучение акустических импульсов сферическим тонкостенным пьезопреобразователем с разрезными электродами // Электроніка і зв'язь. – 2007. – № 3(38). – С. 43–48.
62. Моргунов И.О. Действие плоской нестационарной волны давления на сферический пьезокерамический преобразователь с внутренним экраном // Электроніка і зв'язь. – 2007. – № 1. – С. 62–69.
63. Коржик О.В. Об особенностях электромеханических преобразований в приемных пьезокерамических преобразователях с разрезными электродами // Электроніка і зв'язь. Тематический выпуск «Электроніка і нанотехнології». – 2010. – № 2(55). – С. 224–230.
64. Коржик О.В., Лейко О.Г. Формування характеристик напрямленості одиночного приймального електропружного циліндричного перетворювача з розрізними електродами // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2005. – № 1. – С. 50–55.
65. Коржик О.В., Лейко О.Г. Формирование характеристик направленности антенны, состоящей из двух электроупругих элементов // Электроніка і зв'язь. – 2009. – № 1. – С. 45–53.
66. Коржик О.В., Лейко О.Г. Дослідження акустичних характеристик одиночного п'єзокерамічного циліндричного перетворювача при розв'язанні задачі прийому в наскрізній постановці // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2002. – № 5. – С. 105–113.
67. Коржик О.В., Лейко О.Г. До питання дифракції плоскої акустичної хвилі на електропружному циліндричному прийомному перетворювачі // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2004. – № 6. – С. 83–89.
68. Коржик А.В. Применение метода «сквозной задачи» к исследованию амплитудно-частотных зависимостей характеристик акустического поля приемного цилиндрического пьезокерамического преобразователя с разрезными электродами // Электроніка і зв'язь. Тематический выпуск «Электроніка і нанотехнології». – 2010. – № 3(56). – С. 160–166.
69. Коржик О.В. Применение метода «сквозной задачи» к исследованию амплитудно-частотных зависимостей характеристик механического поля приемного цилиндрического пьезокерамического преобразователя с разрезными электродами // Электроніка і зв'язь. Тематический выпуск «Электроніка і нанотехнології». – 2010. – № 4(57). – С. 155–159.
70. Коржик О.В. Амплитудные и фазовые частотные характеристики электрических напряжений на нагрузках электродов пьезокерамических цилиндрических приемников звука при различных видах электродирования в условиях связанности // Электроніка і зв'язь. Тематический выпуск «Электроніка і нанотехнології». – 2010. – № 5(58). – С. 192–196.

## Информационные системы и технологии

УДК 681.05.007

А.В. Ищенко, В.С. Рогоза, д-р техн. наук

### Агентные технологии: гибридные интеллектуальные системы

Выполнен обзор исследований по вопросам разработки гибридных интеллектуальных систем, как инструментальных средств решения сложных задач. Проанализированы особенности алгоритмической и структурной организации таких систем, представлены их классификационные схемы и этапы построения. Также показана роль агентов в реализациях гибридных интеллектуальных систем.

The current paper presents the survey of investigations on developing hybrid intelligent systems as a tool for solution of complex problems. The specific features of developing hybrid intelligent systems algorithmic and structural building are analyzed, classification schemes are given, the stages of building developing hybrid intelligent systems are discussed, and the role of they implementations with the use of agents are pointed out in the paper.

**Ключевые слова:** агенты, агентно-ориентированная реализация, гибридные интеллектуальные системы, мультиагентная система, мягкие вычисления, синергизм.

#### Введение

В связи с усложнением задач, решаемых с привлечением компьютерных средств, особого внимания заслуживают исследования технологий построения компьютерных систем, составленных из «интеллектуальных» компонентов. Хотя понятие «интеллектуальности» искусственных объектов до сих пор четко не определено, однако в практических реализациях компьютерных систем под эту категорию обычно попадают такие объекты, которые способны действовать рационально в среде, подверженной непрерывным изменениям. Поведение объектов считается рациональным, если все их действия направлены на достижение поставленной цели при минимальных вычислительных затратах.

Современные интеллектуальные информационные системы предоставляют пользователям богатый арсенал инструментальных средств для решения самых разнообразных задач из области экономики, инженерного проектирования, дистанционного обучения, управле-

ния виртуальными производствами и научных исследований. Неоспоримым является факт успешного внедрения таких систем во многие сферы нашей жизни. Достаточно вспомнить примеры Web-услуг, предоставляемых Интернетом, средства поиска и отбора информации Data Mining, инструменты мультимедиа или, скажем, Grid-технологии распределенных научных исследований.

Принципиальную особенность интеллектуальных информационных систем исследователи усматривают в том, что по своим функциям такие системы являются сложными объектами для исследований, поскольку они характеризуются такими специфическими свойствами, как [1–5]:

- неоднородность состава;
- способность компонентов системы к адаптации поведения с учетом изменяющихся условий окружающей среды;
- невозможность во многих случаях точного предсказания будущих действий системы по результатам оценки ее прошлых состояний.

В развитии математической платформы интеллектуальных информационных систем важную роль играют как традиционные математические дисциплины (например, как системный анализ), так и новые направления исследований, разрабатываемые на стыке математики и информатики, которые получили развитие в последние десятилетия. К ним, прежде всего, следует отнести методы искусственного интеллекта (ИИ), которые в среде исследователей получили название методов «мягких» вычислений (soft-computing), а именно: нечеткую логику, нейронные сети, эволюционные вычисления, машинное обучение, методы выявления данных в распределенных средах (методы Data Mining), методы теории игр и комбинаторной оптимизации, методы логического вывода и экспертные системы. Альтернативой этим методам являются традиционные методы прикладной математики, которые иногда называют термином «жесткие» вычисления («hard-computing»). Методы решения задач, в основе которых используются комбинации методов первой и второй групп или только лишь методы мягких вычислений, составляют математическую основу для



построения так называемых *гибридных интеллектуальных систем* (ГИС). Одним из выразительных средств программной реализации ГИС можно считать *агентные системы*, разнообразные реализации которых появились в последние десять лет.

Авторы, насколько это было возможно, старались отдавать предпочтение ранним публикациям, которые положили начало исследованиям тех или иных обсуждаемых в работе вопросов.

Целью работы является обзор исследований по вопросам разработки гибридных интеллектуальных систем как инструментальных средств решения сложных задач. В работе описаны две классификационные схемы ГИС, перечислены этапы их построения. Отмечена роль агентов в реализациях гибридных интеллектуальных систем.

### 1. Определения гибридных интеллектуальных систем

Гибридные интеллектуальные системы представляют собой программные комплексы, предназначенные для решения сложных задач системного проектирования и построенные с использованием комбинаций методов мягких и жестких вычислений, т. е. с использованием гибридных методов вычислений.

В этом определении не оговаривается способ программной реализации таких комплексов, поскольку он определяется тем кругом задач и, соответственно, теми методами, которые выбраны для решения задач в определенной предметной области, а также платформой, на которой реализуется ГИС. Вместе с тем, нужно отметить факт известной «специализации» методов мягких вычислений. Например, нейронные сети изначально создавались как инструментарий для аппроксимации функций, поэтому с помощью нейронных сетей успешно решаются те прикладные задачи, в которых центральное место занимают методы аппроксимации, интерполяции и экстраполяции функций. К таким задачам относятся, например задачи адаптивного управления, построения самообучающихся систем, распознавания образов и речи и ряд других. В задачах, требующих адаптации методов и стратегий решения, нейронные сети имеют явное преимущество перед другими подходами, разрабатываемыми в теории ИИ, например, такими, как экспертные системы.

Однако нейронные сети не являются универсальным инструментом решения всех возможных задач. Так, например, в задачах принятия решений, требующих явных объяснений пу-

тей получения искомым результатов, нейронные сети оказываются беспомощными по сравнению, скажем, с методами вывода правил по индукции, дедукции или абдукции, которые применяются в экспертных и советующих системах.

Часто в системах интеллектуальных вычислений используются нечетко определенные данные, на основе которых строятся так называемые нечеткие рассуждения и делаются приближенные выводы. Структуры данных в таких системах могут содержать нечетко заданные числа и описания в словесной форме (последние относятся к категории лингвистических переменных и констант). Поскольку нечеткость высказываний характерна для человеческих рассуждений, такие системы приближены к способу описания мира в категориях, близких человеку: убеждений, суждений, предпосылок, приближенных числовых характеристик, мнений и т. п. Методы нечеткой логики находят применение в построении экспертных и советующих систем, систем перевода с одного языка на другой, при построении нечетких систем управления и в ряде других приложений.

Наконец, если для решения задач в системе используются эволюционные вычисления, она приобретает способности производить систематизированный случайный поиск и находить оптимальные решения даже в тех случаях, когда целевые функции характеризуются свойствами, усложняющими применение классических методов оптимизации, например, если эти функции мультимодальны. Поэтому генетические алгоритмы успешно применяются для решения задач многоэкстремальной комбинаторной оптимизации.

Однако чаще всего решение сложных задач предполагает использование одновременно нескольких подходов. Рассмотрим пример из области решения экономических задач. Положим, создается интеллектуальная система, предназначенная для моделирования и прогноза состояния рынка ценных бумаг. В этой системе нейронные сети могут быть успешно использованы для классификации различных форм, используемых на рынке ценных бумаг, а также при решении задач планирования финансовых инвестиций. Генетические алгоритмы можно использовать в такой системе для предсказания процентных ставок, а приближенные рассуждения, основанные на нечеткой логике, – для оценки способности клиентов сохранять устойчивость к финансовому риску [6–8].

Объединение методов мягких вычислений может осуществляться двумя путями – на мак-

ро- и микроуровне. Системная интеграция методов на *макроуровне* предполагает формирование ГИС из набора специализированных модулей, каждый из которых реализует один из подходов мягких вычислений и функционирует независимо от других. Системная интеграция методов на *микроуровне* является более высокой формой кооперации методов интеллектуальных вычислений и предполагает реализацию комбинированных подходов непосредственно в методах мягких вычислений; такой способ создания интегрированных методов мягких вычислений определен в литературе термином «синергизм». Например:

- методы, сочетающие в себе методы нейронных сетей и нечеткой логики, относят к категории нейро-нечеткого синергизма (*neuro-fuzzy sznergism*);
- методы, в которых объединены технологии нейронных сетей и генетических алгоритмов, относят к категории нейро-генетического синергизма (*neuro-genetic\_algorithm synergism*);
- методы, сочетающие в себе технологии нечетких систем и генетических алгоритмов, относят к разряду нечетко-генетического синергизма (*fuzzy-genetic\_algorithm synergism*) и т.д.

Такие сочетания методов мягких вычислений составляют основу так называемых *гибридных синергетических методов интеллектуальных вычислений* [7].

Развитие методов интеллектуальных вычислений, и, прежде всего, гибридных синергетических методов, стимулировало разработку парадигмы *интеллектуальных программных агентов*, как способа программной реализации указанных методов. Некоторые авторы работ по ИИ склонны считать, что искусственный интеллект – это по существу теоретическая платформа интеллектуальных агентов [6].

С точки зрения программной реализации агенты – это компоненты централизованных или распределенных информационных систем, которые характеризуются двумя важными свойствами: во-первых, они обладают способностью к *автономным действиям*, и во-вторых, если речь идет о распределенных системах агентов (такие системы называется *мультиагентными*), то в них агенты способны взаимодействовать между собой путем обмена сложными структурами данных и самостоятельно принимать решения о дальнейших действиях, анализируя состояния среды; подобные действия агентов относят к категории *социальной активности*. Точнее говоря, под социальной активностью

агентов понимаются такие их действия, которые направлены на достижение поставленной цели путем установления сотрудничества с другими агентами. В мультиагентных системах отдельные агенты являются специализированными объектами и выполняют свои собственные задачи, а координация их взаимодействия осуществляется специальным *агентом-менеджером* [6, 8, 9].

## 2. Гибридные интеллектуальные системы как инструмент решения сложных задач

Гибридные интеллектуальные системы позволяют оперировать различными типами и формами представления данных и знаний, которые могут поступать от различных источников, а также уточнять информацию о предмете исследования, которые используются в процессах рассуждений и принятия решений, достигая, таким образом, более эффективных результатов по сравнению с традиционными подходами [10, 11]. Одной из функций ГИС является способность поиска путей решения задач в средах с нечетко и/или не полностью определенными состояниями, поэтому их программные реализации, такие, например, как агенты, должны обладать способностью оперировать неточной и неполной информацией и достигать поставленных целей путем адаптации своего поведения. В терминологии, предложенной Л. Заде, системы моделирования, функционирующие в нечетко определенных условиях, должны иметь высокий коэффициент машинных интеллектуальных способностей – КМИС (*MIQ, machine intelligent quotient*). Установлено, что из всех возможных версий интеллектуальных систем наибольшим КМИС обладают именно ГИС с системной интеграцией методов на микроуровне [12]. Однако при реализации подобных систем возникает проблема сложности управления процессами вычислений, поскольку они, как правило, состоят из большого числа взаимодействующих между собой программных компонентов, причем эти взаимодействия обычно возникают в непредсказуемые моменты времени по неопределенным заранее причинам между произвольными компонентами. Эти особенности функционирования ГИС принципиально отличают их от традиционных систем моделирования и решения задач и именно они служат основанием для того, чтобы считать действия ГИС интеллектуальными.

Многими исследователями отмечается тот факт, что, хотя программирование методов мягких вычислений, составляющих математическую основу ГИС, является трудной задачей

самой по себе, но все же главной проблемой создания подобных систем является организация системы управления и механизмов взаимодействия компонентов системы. При этом разработчикам необходимо решать следующие вопросы:

- какие методы подходят для определенных типов задач (классификация методов и задач);
- какими сообщениями компоненты ГИС могут обмениваться между собой, и в какой форме эти сообщения следует представлять (если формой реализации ГИС является распределенная среда, то здесь речь идет о протоколах обмена данными);
- как обеспечить легкую замену одних методов на другие, оказавшиеся более удачными для решения данной конкретной задачи, а также каким образом облегчить легкий доступ к данным, хранящимся на различных компонентах системы (вопросы открытости и масштабируемости системы);
- как определять местонахождение тех или иных данных и компонентов в системе, в особенности в тех случаях, когда в распределенной структуре некоторые компоненты системы могут мигрировать от одного компьютера к другому, и каким образом в условиях неоднородной компьютерной среды обеспечить эффективную совместную работу компонентов системы для решения сложных задач, учитывая разнообразие языков программирования, операционных систем и аппаратного окружения.

Хотя эти вопросы являются предметом активных обсуждений в периодических изданиях уже в течение довольно продолжительного периода времени, необходимо признать тот факт, что по сей день отсутствуют универсальные рекомендации, касающиеся практической реализации систем управления ГИС. Для выработки таких рекомендаций в литературе выполняется определенная систематизация основных подходов и их практической реализации. В работе [13] на примерах практической реализации ГИС обоснованы следующие положения:

- Сложность часто принимает форму иерархии. Т. е. система состоит из взаимосвязанных подсистем, каждая из которых, в свою очередь, проявляет структурную иерархию. Указанная иерархия по-разному реализуется в различных системах, однако обнаруживаются некоторые общие формы управления подобными иерархическими структурами, которые реализованы в некоторых известных моделях, таких, например,

как модели распределенных систем *клиент-сервер*, *равноправных узлов* и командной обработки на основе модели *классной доски*. Дополнительная сложность, присущая именно ГИС, состоит в том, что взаимосвязи между ее компонентами, как правило, не статичны, а могут изменяться во времени.

- ГИС с устойчивыми промежуточными уровнями иерархии более открыты и масштабируемы по сравнению с теми структурами, в которых такие промежуточные уровни не найдены.
- При проектировании ГИС следует различать два типа взаимодействий: те, которые осуществляются между небольшими частями системы, выполняющими относительно простые функции, и те, которые реализуются между крупными подсистемами ГИС. Первые более быстрые и более предсказуемые, чем вторые; соответственно, необходимо предусмотреть различные механизмы управления такими взаимодействиями.

Разделение взаимодействий компонентов ГИС на указанные две группы можно схематически представить так, как показано на рис. 1 [14]. На рисунке показано, что система может быть разделена на ряд крупных частей (подсистем), взаимодействия между которыми характеризуются относительно малой частотой и называются *слабыми связями*.

Внутри каждой подсистемы выделяются ряд более мелких компонентов с относительно высокой частотой взаимодействий, то есть компонентов с *сильными связями*. Двухнаправленными стрелками отражены слабые связи между подсистемами, пунктирными линиями – слабые связи между конкретными компонентами этих подсистем, а сплошными линиями – сильные связи между компонентами внутри подсистем.

Руководствуясь изложенными выше соображениями, разработчики программного обеспечения (ПО) сформулировали три базовых принципа реализации ГИС [14]:

- *Декомпозиция*, т. е. разделение функций ГИС на более простые действия. Этот принцип, давно применявшийся при реализации программных комплексов, оказался действенным и в реализациях ГИС, в особенности в условиях специализации отдельных частей синергетических ГИС.
- *Абстрагирование* – это процесс определения упрощенной модели системы, в которой выделены наиболее существенные свойства и детали проекта (которые должны быть отражены в общей структурной схеме ГИС) и

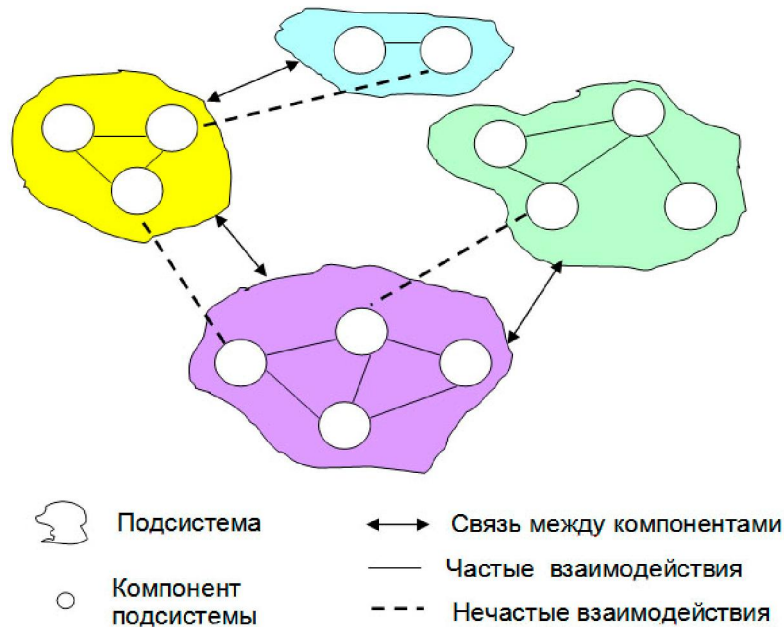


Рис. 1.

опущены второстепенные детали. Цель абстрагирования – создание «настолько упрощенной модели системы, насколько это возможно, но не проще».

- *Иерархическая структурная организация*, т.е. разделение функций ГИС по уровням иерархии. В процессе такого разделения осуществляется идентификация функций частей системы и формулирование правил управления взаимодействиями компонентов решения задачи, расположенных на различных уровнях иерархии.

Эти принципы позволяют формализовать процессы реализации проекта ГИС, помогая разработчикам преодолевать трудности и избегать ошибок, которые сопутствовали проектировщикам первых ГИС.

### 3. Агенты как инструментальный построения ГИС

Агентные технологии, развивавшиеся поначалу параллельно и независимо от методов построения ГИС, в настоящее время предоставляют в руки разработчиков эффективные инструментальные средства программной реализации ГИС. Принципы, закладываемые в организации агентных систем, оказались близки к тем, на которых строятся ГИС, а кроме того, эти два направления дополняют друг друга, способствуя расширению области применений компьютерного моделирования, основанного на методах ИИ [15, 16]. В качестве подтверждения этих положений, приведем определение агентов, известное в среде разработчиков программного обеспечения [9, 15, 16]:

*Агент – это специализированный программный компонент, который функционирует в некоторой среде и способен к гибким автономным действиям в этой среде, направленным на достижение проектных целей прозрачно (то есть, незаметно) для пользователя.*

Областями, в которых агенты нашли особенно широкое применение, являются интеллектуальные производства и интеллектуальные системы инженерного проектирования. Если рассматривать производственные и проектные задачи с точки зрения парадигмы агентно-ориентированного проектирования, то становится понятным, что решение большинства таких задач требует использования множества специализированных агентов, действующих в среде децентрализованно. Таким образом, особенностью среды агентов является наличие не только управляющего органа, осуществляющего общее планирование процессов решения задач, но и множества локальных пунктов управления, причем каждый такой пункт управления реализует интересы вполне определенной группы агентов.

В некоторых высокоорганизованных мультиагентных системах интересы одной группы могут конкурировать с интересами другой группы. Здесь конкуренцию следует понимать как способ получения приемлемых результатов решения задач параллельно несколькими группами агентов, каждая из которых может следовать своим путем. Обычно принимается одно из альтернативных найденных решений по принципу «прав тот, кто решил задачу быстрее других». Такое решение должно удовлетворять оп-

ределенным заранее критериям, но вместе с тем, оно может не оказаться наилучшим среди всех возможных. Следует отметить, что упомянутый принцип принят во многих существующих системах интеллектуальных вычислений и вытекает из тех соображений, что в практической деятельности мы часто можем быть вполне удовлетворены «хорошим» (в определенном смысле) решением, несмотря на то, что оно может оказаться и не самым лучшим.

Некоторой аналогией мультиагентной среды с конкурирующими компонентами можно считать рыночную систему, исследованную в теории игр фон Неймана и Моргенштерна [17]. Однако, в отличие от рыночных субъектов, изучаемых в теории игр, агенты в большей степени, чем эти субъекты, нуждаются во взаимодействии друг с другом для достижения своих собственных целей и в управлении этими взаимодействиями. Поэтому мультиагентная система может быть определена как «слабо связанная» (loosely-coupled) или «сильно связанная» (closely-coupled) сеть сущностей (агентов), которые работают вместе для принятия решений, выходящих за пределы возможностей отдельных сущностей или их знаний» [18]. Эти сущности автономны и образуют вместе гетерогенную среду. На основании этих соображений, характеристики мультиагентных систем определены в работе [19] следующим образом:

- каждый агент обладает неполной информацией или возможностями для принятия решений для конкретной задачи, т. о. каждый агент имеет ограниченный кругозор;
- общая для всех агентов система управле-

ния, как правило, не является единственной системой управления в системе агентов, а порой она вообще отсутствует; агенты находятся под управлением также и локальных систем управления, которые могут быть реализованы непосредственно в составе каждого агента; поэтому говорят, что агентные системы характеризуются децентрализованным управлением;

- вычисления, выполняемые агентами, асинхронны.

В данном контексте уместно применить термин «интеллектуальные» агенты для обозначения сущностей, которые, действуя автономно, вместе с тем проявляют социальную активность для «достижения своих целей и выполнения своих задач, оптимизируя некоторые заданные характеристические параметры» [20].

Таким образом, парадигма мультиагентных систем вполне согласуется с концепцией гибридных интеллектуальных систем. По аналогии с канонической структурой ГИС, приведенной на рис. 1, в работе [21] приведены несколько примеров канонических форм мультиагентных систем, одна из которых показана на рис. 2.

Агентно-ориентированная реализация ГИС предполагает декомпозицию решаемой задачи на множество подзадач, решаемых отдельными группами агентов. Последние способны взаимодействовать друг с другом для достижения общих целей. Обмен данными и взаимодействие агентов могут быть реализованы с использованием известных технологий, например, с применением программных средств Web-систем.

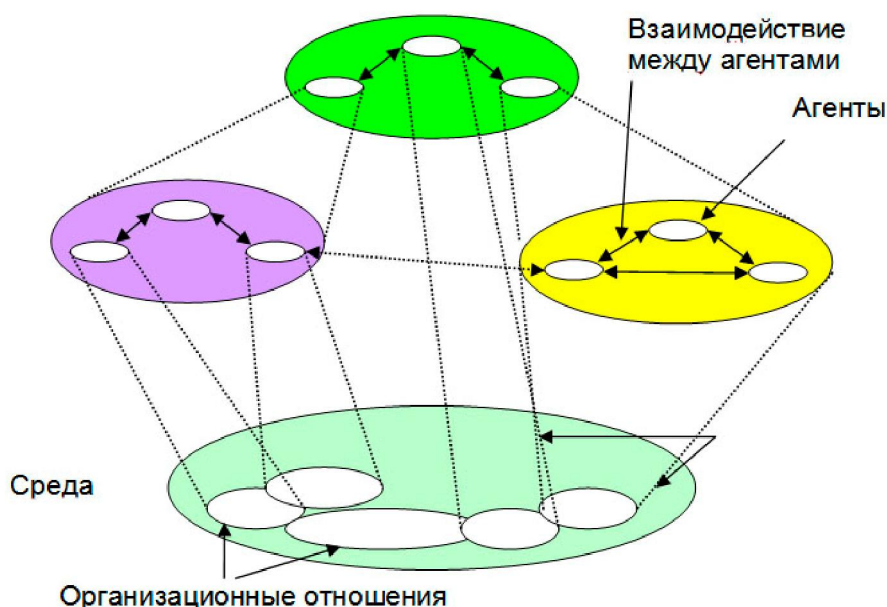


Рис. 2.

#### 4. Классификация гибридных интеллектуальных систем и этапы построения ГИС

Интеллектуальные системы могут быть классифицированы на основе различных критериев. Рассмотрим две типовые схемы классификации по Медскеру-Бейли и Гунатилейку-Хеббалу.

В работе [22] Медскер (Medsker) и Бейли (Bauly) исследовали вопросы построения синергетических ГИС на основе объединения методов экспертных систем и нейронных сетей и выделили пять различных стратегий гибридной реализации таких систем (рис. 3). Дополнительные сведения по этому вопросу можно найти в работах [21–24]. В качестве составляющих элементов модели *автономных комбинированных интеллектуальных систем* выступают программные модули, один из которых реализует методы нейронных сетей, а второй – методы экспертных систем.

В рамках этой модели ГИС предполагается, что указанные модули работают независимо друг от друга и не взаимодействуют между собой в процессе решения задач. Одним из преимуществ такой системы является относительная простота и легкость построения ПО с использованием доступных в продаже коммерческих пакетов. Вместе с тем, каждый модуль работает независимо, поэтому преимущества одного из них не восполняют недостатки другого.

*Модель системы преобразования* отличается от предыдущей тем, что в этом случае ГИС начинают свою работу как система одного типа (например, как нейронная сеть), а заканчивает – как система другого типа (например, как экспертная система). Когда одна подсистема завершает свою работу, полученные ею данные преобразуются к виду, который может быть воспринят второй подсистемой, после чего первая подсистема заканчивает свою работу. Таким образом, данная модель реализует идею интеграции методов мягких вычислений в ограниченном виде. К недостаткам данной модели относят следующие: во-первых, не существует полностью автоматизированных средств преобразования экспертной системы к нейронной сети или обратно; программная реализация таких преобразований возлагается на проектировщиков и не является тривиальной задачей; и, во-вторых, внесение изменений в систему может повлечь за собой необходимость разработки дополнительных преобразователей форматов данных, которыми обмениваются подсистемы.

*Модели ГИС со слабыми связями и сильными связями* являются формами ГИС с интеграцией компонентов на высоком уровне и основаны на использовании категорий слабых системных связей (*loosely-coupled interconnections*) и сильных системных связей (*closely-coupled interconnections*) (см. пояснения к рис.1). Сильная связь между компонентами системы приводит



Рис. 3.



к тому, что изменения в устройстве и функционировании одного компонента влекут соответствующие изменения в других компонентах, с которыми данный компонент обменивается сообщениями с высокой частотой. Поскольку оба способа связей, как правило, используются в технологии экспертных систем и нейронных сетей, то обычной схемой реализации сильно связанных ГИС считается такая, при которой такие системы пересылают сообщения в форме структур данных с использованием резидентной памяти, а не через внешние файлы данных. Это улучшает свойства интерактивности тесно связанных модулей. По сравнению с системами с сильными связями, модель со слабыми связями легче реализовать на практике и она допускает большую свободу в выборе интерфейсов и модификации составляющих программных модулей. Однако в обеих моделях не предусмотрен доступ извне к внутренним процессам каждой из подсистем, что может повлечь за собой частичное дублирование вычислительных процедур, выполняемых каждой из подсистем.

Общей для обеих систем особенностью является то, что вследствие использования специального интерфейса передачи файлов, коммуникация усложняется, соответственно время работы возрастает по сравнению с предыдущими вариантами ГИС. В целом, сильная связность обеспечивает большую гибкость и робастную интегральность, чем слабая связность.

*Полностью интегрированные системы* построены на принципе совместного использования обеими подсистемами структур данных и баз знаний. Коммуникация между различными компонентами осуществляется дуальным способом (напр., посредством передачи сложных структур данных, содержащих одновременно символьную информацию, интерпретируемую на семантическом уровне, и наборы числовых данных). Рассуждения формируются либо кооперативно, либо с использованием дополнительного компонента, работающего как некий универсальный анализатор.

К преимуществам модели полной интеграции следует отнести высокий уровень робастности и возможность получения потенциально лучших решений сложных задач по сравнению с предыдущими подходами. Эти свойства являются результатом дуальной природы представления знаний и структур данных. Кроме того, такие ГИС характеризуются сравнительно небольшой избыточностью. И наконец, полностью интегрированные модели в принципе позволяют реализовать весь набор «интеллектуальных» свойств подобных систем, таких как адаптация,

устойчивость к случайным сбоям, а также реализация способности к объяснению результатов логического вывода в сочетании с высоким уровнем обучаемости.

Недостатком модели полной интеграции является сложность реализации межмодульных взаимодействий и управления потоками сообщений. Проблема широкого использования подобного класса ГИС усугубляется тем обстоятельством, что на рынке ПО пока отсутствуют программные средства, которые отвечали бы требованиям совместимости и открытости. Не полностью решены также вопросы верификации и контроля подобных ГИС.

Авторы второй классификационной системы Гунатилейк (Goonatilake) и Хеббал (Hebbal) [7, 25] отмечали, что существуют три главных причины для создания гибридных интеллектуальных систем:

- улучшение качества технологий решения интеллектуальных задач;
- многообразии прикладных задач, решение которых связано с привлечением методов ИИ;
- разнообразии целей применения ГИС.
- Основываясь на эти тезисы, они разделили гибридные системы на три класса (рис. 4).

В *гибридных системах с замещением функций* реализуется методология объединения функций в общей интеллектуальной компьютерной среде. В процессе решения задачи одна функция (метод) может быть заменена другой функцией (методом), если первая не позволяет получить ожидаемых результатов. Таким образом, главной мотивацией таких замещений функций является стремление добиться наилучших результатов при минимизации объемов вычислений.

*Гибридные системы со взаимодействующими между собой компонентами* состоят из независимых, самостоятельных, интеллектуальных процессорных модулей, которые обмениваются информацией и выполняют отдельные функции для выработки совместных решений. Такие системы по своим действиям напоминают рассмотренные выше системы преобразования (по классификации Медскера-Бейли).

Если задача может быть разделена на отдельные подзадачи, тогда для решения каждой из них можно использовать независимые интеллектуальные модули, предназначенные для решения задач данного класса. Работа этих независимых модулей, которые совместно решают поставленную задачу, координируется общим модулем управления.

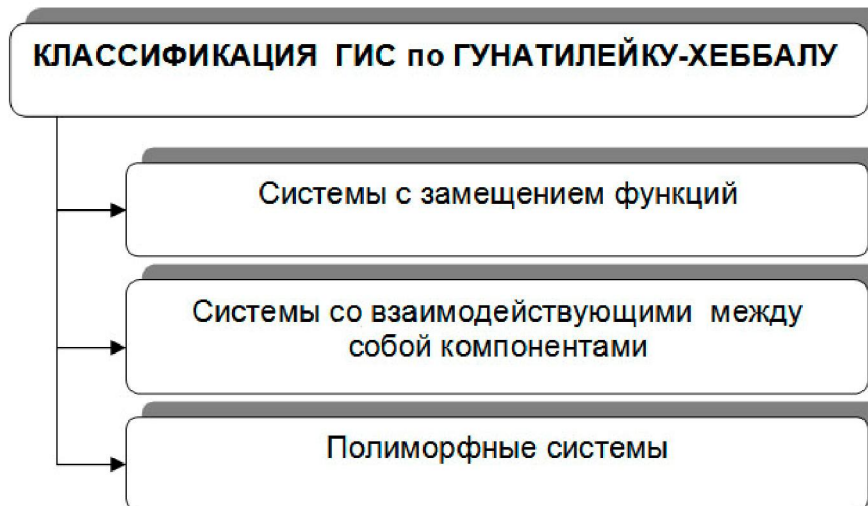


Рис. 4.

*Гибридные полиморфные системы* – это такие системы, которые используют единую процессорную архитектуру для реализации функций различных интеллектуальных методов мягких вычислений. Общей мотивацией создания таких систем является стремление разработчиков к реализации многофункциональности в рамках единой вычислительной архитектуры.

### Выводы

Проанализированы возможности развития специальных программных технологий, например таких, как парадигма агентно-ориентированного, аспектно-ориентированного, компонентного и эволюционного программирования. Рассмотрена проблематика построения адаптивных систем с привлечением новых компьютерных технологий вычислений, таких, как генетические алгоритмы, ДНК-вычисления, квантовые вычисления и ряд других.

Представлены следующие перспективные принципы разработки гибридных интеллектуальных систем [8, 9, 16, 21–25]:

- *Агентно-ориентированная декомпозиция.* ГИС составляются из ряда иерархически связанных подсистем, которые взаимодействуют между собой для достижения общих целей и управляются единым программным модулем или набором локальных управляющих модулей. Построение ГИС в подобной форме связано с декомпозицией задач, которая может быть реализована на основании агентно-ориентированной парадигмы программирования.
- *Установление соответствия между абстрактным описанием задач, решаемых ГИС, и их агентно-ориентированной реализацией в составе ПО.* При проектирова-

нии ГИС наиболее удачной формой декомпозиции программной модели считается такая, при которой программные модули, из которых составляется ГИС, ориентированы на решение тех или иных классов подзадач и, следовательно, являются специализированными объектами. Подобный принцип декомпозиции естественным образом может быть положен в основу агентно-ориентированной реализации ГИС.

- *Учет требования гибкого управления изменяющимися организационными структурами.* Замена или модификации, вносимые в те или иные компоненты ГИС, не требуют перестройки остальных компонентов, поскольку все функции по согласованию взаимодействия этих компонентов возлагаются на промежуточные агенты.

### Литература

1. *Винер Н.* Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. – М.: Сов. радио, 1968. – 328 с.
2. *Ивахненко А.Г., Зайченко Ю.П., Димитров В.Д.* Принятие решений на основе самоорганизации. – М.: Сов. радио, 1976. – 280 с.
3. *Фельдбаум А.А.* Основы теории оптимальных автоматических систем. – М.: Наука, 1966. – 623 с.
4. *Цыпкин Я.З.* Адаптация и обучение в автоматических системах. – М.: Наука, 1968. – 400 с.
5. *Эшби У.Р.* Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1962. – 400 с.
6. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект. Современный подход. – М.: Вильямс, 2003. – 1408 с.



7. *Goonatilake S., Campbell J., Ahmad, N. Genetic-Fuzzy Systems for Financial Decision Making // Advances in Fuzzy Logic, Neural Networks and Genetic Algorithms / Ed. T. Furuhashi. – Springer, 1995. – P. 202–223.*
8. *Wooldrige M., Jennings N., Kinney D. The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design // Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 2000. – Vol. 3, № 3. – P. 285–312.*
9. *Jennings N.R. On Agent-Based Software Engineering // Artificial Intelligence. – 2000 – Vol. 117. – P. 277–296.*
10. *Booch G. Object-Oriented Analysis and Design with Applications. – Addison Wesley. – 1994. – 650 p.*
11. *Dong Chun Lee, Keun Wang Lee. Design and Implementation of Multi-Agents for Learner-oriented Course Scheduling on the Internet // E-Service Intelligence. Methodologies, Technologies and Applications / Ed. J. Lu, D. Ruan, G. Zhang. – Springer, 2007. – P. 601–626.*
12. *Zadeh L.A. The roles of fuzzy logic and soft computing in the conception, design and deployment of intelligent systems // Software Agents and Soft Computing: Concepts and Applications / Ed. H.S. Nwana, N. Azarmi. - Berlin: Springer-Verlag, 1997. – P. 183.*
13. *Simon H. The Sciences of the Artificial. – MIT Press, 1966. – 412 p.*
14. *Bergenti F., Marie-Pierre Gleizes, and Zambonelli F. Methodologies and Software Engineering for Agent Systems. The Agent-Oriented Software Engineering Handbook. – Kluwer Academic Publishers, 2004. – 505 p.*
15. *Jennings N., Wooldridge M. Agent-Oriented Software Engineering // Handbook of Agent Technologies / Ed. J. Bradshaw. – MIT Press, 2001. – P. 180–196.*
16. *Wooldridge M. Agent-Based Software Engineering // IEEE Proc. Software Engineering. – 1997. – Vol. 144, № 1. – P. 26–37.*
17. *Von Neumann J., Morgenstern O. Theory of Games and Economic Behavior. – Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1944. – 512 p.*
18. *Durfee E.H. and Lesser V. Negotiating Task Decomposition and Allocation Using Partial Global Planning // Distributed Artificial Intelligence / Ed. L. Gasser, M. Huhns. – Pitman Publishing and Morgan Kaufmann, 1989. – Vol.II. – P. 229–244.*
19. *Jennings N.R., Sycara K., and Wooldridge M. A Roadmap of Agent Research and Development. // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 1998. – vol. 1. – P. 7–38.*
20. *Weiss G. Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence. – MIT Press, 1999. – 480 p.*
21. *Jennings, N.R. An Agent-Based Approach for Building Complex Software Systems // Communications of the ACM. – 2001. – vol. 44, № 4. – P. 35–41.*
22. *Medsker L.R. and Bailey D.L. Models and Guidelines for Integrating Expert Systems and Neural Networks // Hybrid Architectures for Intelligent Systems / Ed. A. Kandel, G. Langholz. – CRC Press, 1992. – P. 154–171.*
23. *Medsker L.R. Hybrid Intelligent Systems. – Kluwer Academic Publishers, 1995. – 512 p.*
24. *Wang L. Balasubramanian S. and Norrie D. Agent-based Intelligent Control System Design for Real-time Distributed Manufacturing Environments // Working Notes of the Agent-Based Manufacturing Workshop. – Minneapolis: MN, 1998. – P. 152–159.*
25. *Dong Chun Lee, Keun Wang Lee. Design and Implementation of Multi-Agents for Learner-oriented Course Scheduling on the Internet // E-Service Intelligence. Methodologies, Technologies and Applications / Ed. J. Lu, D. Ruan, and G. Zhang. – Springer, 2007. – P. 601–626.*

## **Системы телекоммуникации, связи и защиты информации**

УДК 621.391

К.Г. Кебкал, канд. техн. наук

### **Усовершенствование протокола обмена данными по гидроакустическому каналу связи**

Представлены результаты математического моделирования времени передачи данных по гидроакустическому каналу для случаев передачи данных пакетами и группами пакетов. Результаты этого моделирования подтверждены результатами физического эксперимента: продемонстрировано существенное увеличение эффективности использования гидроакустического канала связи и, соответственно, эффективной скорости передачи данных при осуществлении покластерной передачи данных вместо по пакетной.

There are represented the results of mathematical modeling of time of of packet-wise and cluster-wise data transmission via hydro-acoustic channel. The results of physical experiment confirm the results of mathematical model. There is represented the significant enhancement on efficiency of channel use and correspondingly enhancement on effective rate of data transmission during the use of cluster-wise data stream organization instead of packet-wise one.

**Ключевые слова:** гидроакустическая связь, подводная цифровая связь, гидроакустический модем.

#### **Введение**

В электрических и электромагнитных (сотовых) каналах, задержки распространения сигналов  $\tau_d^r$  обычно принимают малые или пренебрежимо малые значения. При скорости распространения электромагнитных сигналов равной  $3 \cdot 10^8$  м/с и протяженностях каналов порядка  $10^0 \dots 10^3$  км задержка  $\tau_d^r$  лежит в пределах от микро- до миллисекунд, а длительность передаваемых пакетов цифровых данных  $T_p^r$  обычно имеет порядок единиц или десятков миллисекунд. Например сотовые системы широко распространенного стандарта GSM предусматривают применение сот радиусом до 35 км ( $\tau_d^r < 0,117$  мс), при этом определенная этим стандартом длительность передаваемого блока

данных (кадра)  $T_p^r$  составляет 4,615 мс [1, 2].

Другие широко распространенные системы цифровой связи – проводные системы – даже в случае передачи данных по длинным трансконтинентальным кабелям, передают пакеты данных с длительностями, существенно превышающими величину задержки распространения в канале. В частности при передаче данных по трансатлантическим кабелям протяженности участков между регенерирующими усилителями/мультиплексорами находятся в диапазоне 200...1000 км ( $\tau_d^r < 3,3$  мс), [3–5], в то время как длительности передаваемых по кабелям пакетов данных обычно имеют порядок десятков или сотен миллисекунд.

Из изложенного выше следует, что для наиболее распространенных систем цифровой связи справедливо неравенство  $\tau_d^r \ll T_p^r$ . Следовательно, как проводной канал, так и канал наземной сотовой связи, можно условно охарактеризовать как канал без задержки распространения сигнала.

Очевидно, что в таких каналах все три наиболее распространенных протокола автоматического запроса повторной передачи поврежденных данных (ARQ) [6] могут использоваться с равновероятным успехом.

Несколько иная ситуация со спутниковыми системами цифровой связи. Основные глобальные спутниковые системы Iridium, Globastar (стандарт IS-95) предусматривают использование спутников на высотах 780...1400 км и при максимальном отклонении направления передачи данных от вертикали наклонная дальность связи может достигать 4400 км ( $\tau_d^r < 14,7$  мс). При этом длительность передаваемого пакета данных (фрейма)  $T_p^r$  является соизмеримой величиной и составляет 20 мс [2]. Основные региональные спутниковые системы радиосвязи Thuraya, Gurada (стандарт GMR-1, GMR-2) предусматривают использование спутников на высотах около 2000 км. Линейные размеры территорий, на которых обеспечивается покрытие,

могут достигать 10000 км (покрытие Европы, Центральной Азии и Северной Африки [2]). В этом случае задержка распространения сигнала в канале может достигать  $\tau_d^r = 33,3$  мс – величину, соизмеримую с длительностью блока данных (кадра)  $T_p^r = 40$  мс [2] соответствующей региональной спутниковой системы. Следовательно для спутниковых систем цифровой связи задержка распространения  $\tau_d^r$  является соизмеримой с длительностью блока данных  $T_p^r$ , и канал спутниковой связи можно условно охарактеризовать как канал с умеренной задержкой распространения.

В таких каналах наиболее простой по реализации протокол ARQ с остановками [6] обуславливает существенные потери времени на ожидание подтверждения о доставке данных (квитанции) от принимающей станции. Однако использование других протоколов, в частности ARQ с возвратом и ARQ с выборочной доставкой поврежденных пакетов [6], не препятствует достижению в таких каналах высоких значений эффективной скорости связи.

Иная ситуация наблюдается в подводных акустических каналах. При скорости распространения гидроакустического (г/а) сигнала около  $1,5 \cdot 10^3$  м/с и протяженности канала связи до десяти километров, задержка на доставку квитанции  $\tau_d^h$  может достигать 13,3 с. Такая продолжительная задержка может существенно превышать длительность передаваемого пакета цифровых данных  $T_p^h$ . Она имеет порядок времени когерентности канала связи, на практике составляет от сотен миллисекунд до единиц секунд [7, 8]. Следовательно  $\tau_d^h \gg T_p^h$  и задержкой распространения сигнала в канале пренебрегать нельзя. В этом смысле г/а канал можно охарактеризовать как канал с продолжительной задержкой распространения сигнала.

В работе показано, что в силу сравнительно небольшой скорости распространения г/а сигнала эффективная скорость передачи данных может сильно отличаться от номинальной. Показано, что применение в г/а каналах стандартных (для цифровой радиосвязи, Интернета и пр.) протоколов обмена данными канального уровня является неэффективным. Для усовершенствования средств цифровой г/а связи предложен специализированный протокол канального уровня, учитывающий специфику г/а канала.

## 1. Усовершенствование протокола обмена данными канального уровня

Временная диаграмма обмена данными, соответствующая широко используемому протоколу обмена данными канального уровня в цифровой радио- или проводной связи (протокол автоматического запроса повторной передачи с остановками) [6], представлена на рис. 1, а. После отправки пакета данных, источник цифровой информации ожидает поступления подтверждения о их доставке в виде квитанции о целостности данных и только после получения подтверждения (ACK/NACK) передает следующий пакет. При использовании такого протокола в подводных акустических каналах связи время ожидания квитанции может быть соизмеримым с длительностью пакета данных, или значительно превышать его [1, 7, 9]. Приведем следующий пример, иллюстрирующий этот факт. Для надежной передачи цифровой информации длительность пакета данных  $T_{dp}$  (см. рис. 1, а) часто соизмерима со временем когерентности канала связи. Принимая во внимание сравнительно небольшую скорость распространения акустического сигнала в воде, время ожидания квитанции  $T_{2p}$  может существенно превышать длительность пакета данных  $T_{dp}$  (рис. 1, а). Очевидно, что в результате усреднения на интервале времени  $T_{2p} + T_{dp} + T_{a1}$ , где  $T_{a1}$  – длительность квитанции, эффективная скорость передачи данных ниже, чем скорость, достигаемая внутри интервала передачи пакета данных (обычно эту скорость называют номинальной).

Для сравнения номинальной и эффективной скоростей передачи данных, обозначим их как  $B_p$  и  $B_e^p$  соответственно, и запишем в следующем виде:

$$B_p = \frac{A_{dp}}{T_{dp}};$$

$$B_e^p = \frac{A_{dp}}{T_{dp} + T_{2p} + T_{a1}}, \quad (1)$$

где  $A_{dp}$  – количество информации, передаваемой в одном пакете.

Тогда отношение эффективной к номинальной скорости передачи данных может быть записано как

$$K_e^p = \frac{B_e^p}{B_p} = \frac{T_{dp}}{T_{dp} + T_{2p} + T_{a1}}. \quad (2)$$

Это отношение определяет коэффициент

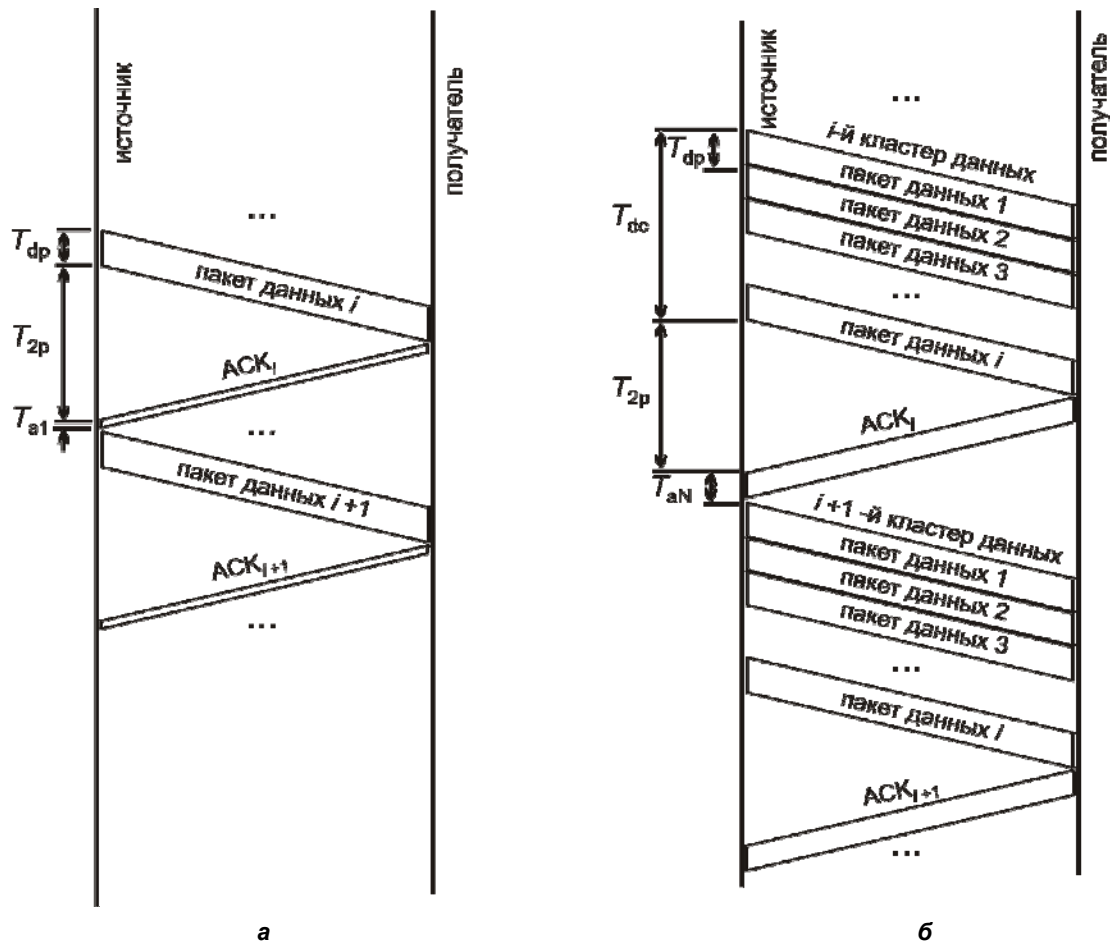


Рис. 1. Иллюстрация протокола обмена данными в разных случаях: а – по пакетному подтверждению доставки данных; б – покластерное подтверждение доставки данных

заполнения канала связи. Очевидно, что при возрастании коэффициента  $K_e^p$ , эффективная скорость передачи данных будет расти. Ниже изучена зависимость  $K_e^p$  от дальности связи.

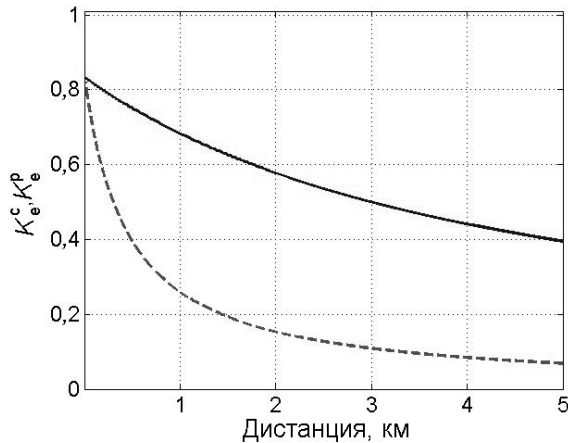
Один из путей увеличения эффективной скорости передачи данных заключается в повышении номинальной скорости передачи данных (внутри интервала  $T_{dp}$ ). Однако в результате усреднения номинальной скорости на интервале времени  $T_{2p} + T_{dp} + T_{a1}$ , возрастание эффективной скорости будет происходить медленно (тем медленней, чем больше дистанция связи). На рис. 2 представлена кривая, иллюстрирующая эту зависимость (штриховая линия). Зависимость построена для следующих условий: длительность пакета данных составляет 0,5 с, длительность квитанции – 0,1 с.

Как следует из рисунка, с увеличением дистанции связи происходит быстрое снижение коэффициента заполнения канала и, соответственно, эффективной скорости передачи данных. Например, на дистанции 100 м эффективная скорость имеет значение близкое к номинальной, а на дистанции 500 м эта скорость уже

вдвое меньше. В целом в диапазоне протяженностей каналов наибольшего практического интереса (т. е. от нескольких сотен метров до нескольких километров) коэффициент использования канала связи не превышает 0,4 (основная часть лежит в пределах 0,1...0,3).

Другой путь увеличения эффективной скорости передачи данных состоит в изменении организации обмена данными.

Протокол обмена данными может основываться на передаче не отдельных пакетов, а кластеров, состоящих из группы пакетов с данными. Временная диаграмма, соответствующая такому протоколу обмена, представлена на рис. 1, б. После отправки группы пакетов (кластера данных), источник цифровой информации ожидает поступления подтверждения о их доставке в виде составной квитанции о целостности данных в каждом из пакетов (составная квитанция содержит значения ACK/NACK для каждого из пакетов кластера). После получения подтверждения, источник передает следующий кластер. Количество передаваемых внутри кластера данных, отнесенное к длительности кластера, далее называется внутривкластерной скоростью.



**Рис. 2. Зависимости коэффициентов заполнения  $K_e^p$  и  $K_e^c$  от дистанции связи**

При использовании такого протокола в подводных акустических каналах связи длительность кластера данных может существенно превосходить время ожидания составной квитанции. Для сравнения внутрикластерной и эффективной скоростей передачи данных, определим их как  $B_c$  и  $B_e^c$  соответственно, и запишем в виде

$$B_c = \frac{A_{dc}}{T_{dc}}, \quad B_e^c = \frac{A_{dc}}{T_{dc} + T_{2p} + T_{a1}},$$

где  $A_{dc} = NA_{dp}$  — количество информации, передаваемой в кластере;  $T_{a1}$  — длительность составной квитанции о целостности данных. В случае следования пакетов данных без пауз (т. е.  $T_{dc} = NT_{dp}$ ), эффективная скорость передачи данных может быть записана в следующем виде:

$$B_e^c = \frac{A_{dp}}{T_{dp} + \frac{T_{2p}}{N} + T_{a1}}. \quad (3)$$

Очевидно, что в определении эффективной скорости для покластерной передачи данных, интервал времени, с которым соотносится тоже количество передаваемых данных, является величиной меньшей, чем в выражении (1), и, соответственно, значение эффективной скорости в выражении (3) будет больше, чем в (1).

Следует отметить, что при комбинировании названных путей, т. е. как увеличении номинальной скорости, так и усовершенствовании протокола обмена данными, рост эффективной скорости передачи будет еще более существенным.

Ниже приведено отношение эффективной скорости к внутрикластерной скорости передачи данных:

$$K_e^c = \frac{B_e^c}{B_c} = \frac{NT_{dp}}{NT_{dp} + T_{2p} + NT_{a1}} = \frac{T_{dp}}{T_{dp} + \frac{T_{2p}}{N} + T_{a1}}.$$

Это отношение определяет коэффициент заполнения канала связи при покластерной организации обмена данными. На рис. 2 представлена зависимость  $K_e^c$  от дальности связи при прежних условиях, но для случая, когда данные передаются не пакетами, а кластерами по десять пакетов. Кривая, выполненная сплошной линией, иллюстрирует эту зависимость. Как следует из рисунка, в случае покластерной передачи данных при увеличении дистанции связи снижение коэффициента заполнения канала и, соответственно, эффективной скорости передачи данных, является сравнительно небольшим. В диапазоне дистанций наибольшего практического интереса коэффициент использования канала связи составляет 0,4 ... 0,7, что свидетельствует о многократном повышении этого коэффициента по сравнению со значениями, характерными для случая рассмотренной выше по пакетной передаче.

Отношение  $K_e^c / K_e^p$  представляет собой зависимость вида

$$R = \frac{K_e^c}{K_e^p} = \frac{T_{db} + T_{2p} + T_{a1}}{T_{db} + \frac{T_{2p}}{N} + T_{a1}}.$$

При заданной (по условиям задачи) длительности пакета данных и длительности квитанции, значение  $R$  будет зависеть от выбранного пользователем числа пакетов  $N$  в передаваемом сегменте данных, а также дистанции связи. Очевидно, что в протяженных каналах, где выполняется условие  $T_{db} + T_{a1} \ll T_{2p}$ , значение  $R$  будет стремиться к  $N$ , а в каналах малой протяженности, где выполняется условие  $T_{db} + T_{a1} \gg T_{2p}$ , значение  $R$  будет стремиться к единице. Таким образом, при работе в протяженных каналах для увеличения коэффициента использования канала связи важным является выбор достаточно большого числа пакетов  $N$  в сегменте данных. С уменьшением дистанции связи, выбор больших  $N$  становится менее существенным. График зависимости отношения  $K_e^c / K_e^p$  от дальности связи, рассчитанный для  $N = 10$ , приведен на рис. 3. Как следует из графика, с увеличением дальности связи, преимущества покластерной передачи данных становятся все более очевидными.

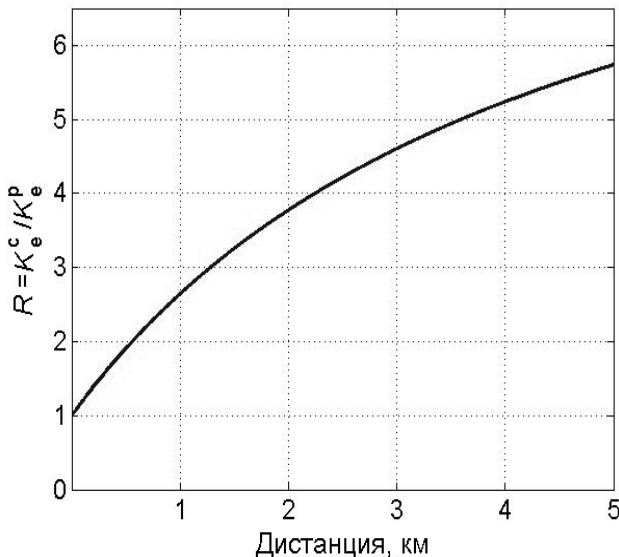


Рис. 3. Зависимость отношения  $K_e^c / K_e^p$  от дальности связи

Следует отметить, что зависимости  $K_e^c$  и  $K_e^p$  определяют лишь достижимые (максимальные) значения эффективной скорости передачи данных для каждой из дистанций связи. В действительности, в условиях сложной помеховой обстановки, возникновение поврежденных пакетов и соответственно необходимость их повторной передачи обычно приводит к снижению эффективной скорости передачи данных по отношению к максимально достижимым значениям. В этой работе анализ помех и интенсивности битовой ошибки, соответствующей данным помехам, не выполнялся. Однако, очевидно, что даже в отсутствие такого анализа предложенное в работе усовершенствование канального уровня (покластерная передача данных вместо по пакетной) будет обуславливать повышенную производительность средств цифровой г/а связи. Дело в том, что как при по пакетной, так и при по кластерной передаче воздействие помех будет приводить к случаям повреждения данных и соответственно квитанции NACK. Однако, если при по пакетной передаче квитанция NACK будет ассоциироваться с полной потерей времени распространения сигнала, то при по кластерной передаче квитанция NACK (на один или несколько пакетов кластера) будет ассоциироваться с потерей лишь части этого времени (обратно пропорционально числу пакетов в кластере). Тогда совокупные потери времени на доставку данных при использовании протокола по кластерной передаче будут меньше, а эффективная скорость выше.

## 2. Экспериментальная верификация результатов моделирования

Количественные характеристики усовершенствованного протокола обмена данными канального уровня были изучены при проведении экспериментов по передаче данных в каналах протяженностью от 100 до 2000 метров в окрестностях города Тулона (Франция) в сентябре 2006 и августе 2007 годов. Часть тестов выполнялась на внутреннем рейде Тулона (горизонтальные плоскопараллельные г/а каналы протяженностью от 100 до 275 м). Другая часть – на внешнем рейде Тулона (наклонные и вертикальные каналы протяженностью от 500 до 2000 м).

При проведении тестов обмен данными был организован следующим образом. На стороне источника данных г/а модем подключался к компьютеру-источнику данных (он всегда инициировал сессию обмена данными). На стороне получателя данных такой же г/а модем подключался к компьютеру-получателю данных (до поступления г/а сигнала, инициирующего сессию обмена данными, он всегда находился в состоянии «прослушивания» канала связи). После начала сессии данные от источника поступали в буфер модема и разбивались на сегменты. Каждый сегмент содержал последовательность из 10 пакетов данных. На принимающей стороне приемник формировал и отправлял составную квитанцию – маску подтверждения о доставке данных ACK/NACK. Модем на стороне источника данных формировал и передавал следующий сегмент и так далее до подтверждения приема всех данных. Каждый пакет содержал 480 бит информации (передавалась псевдослучайная последовательность чисел).

Г/а модемы, использованные для передачи данных, представляли собой устройства, способные выполнять адаптацию скорости передачи данных к свойствам г/а канала. Поэтому для обеспечения условия сравнимости коэффициентов заполнения канала связи при передаче данных на разные расстояния, для построения экспериментальных зависимостей (и далее, таблиц) использовались только такие фрагменты обмена, в которых передача данных осуществлялась с равной скоростью (в частности, около 1000 бит/с) и соответственно равной продолжительностью пакетов. При передаче данных с такой невысокой скоростью поврежденные (невосстановимые) пакеты в выбранных фрагментах обмена отсутствовали.

На рис. 4 приведены фрагменты сессии обмена данными при по кластерной передаче.

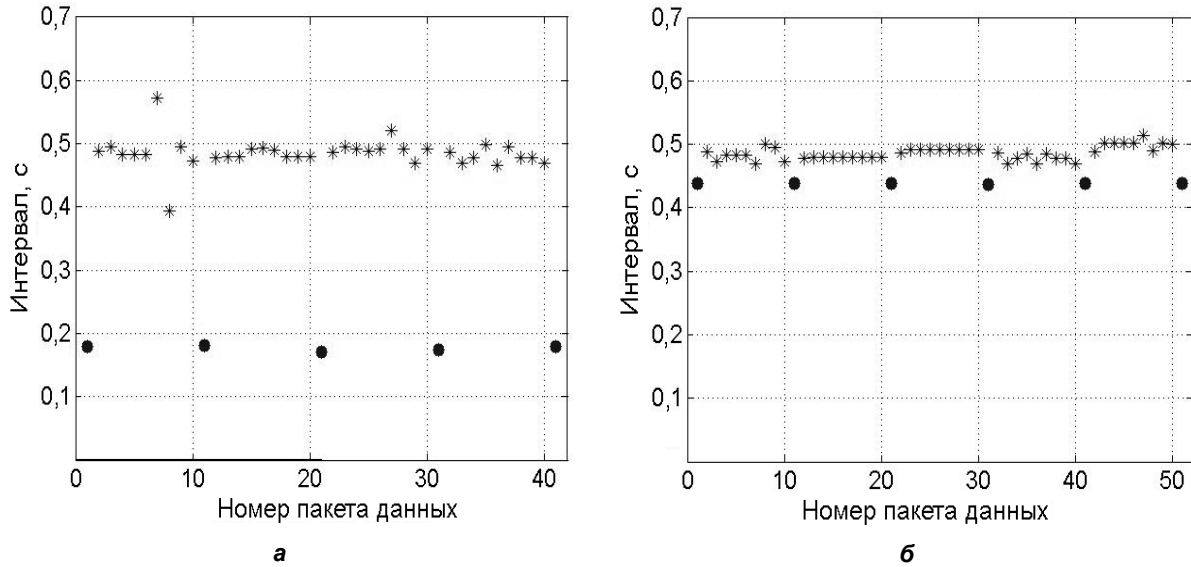


Рис. 4. Фрагмент сессии обмена данными (покластерная передача) на расстояние: а – 125 м; б – 275 м

По оси абсцисс отложены номера пакетов данных, а по оси ординат – интервалы времени, рассчитанные как разности моментов приема соседних пакетов. На рисунках круглыми маркерами обозначены значения интервалов между первым пакетом текущего кластера, и последним пакетом предыдущего (интервалы между кластерами). Как следовало ожидать, меньшим дистанциям связи соответствовали меньшие времена распространения сигналов в канале. Маркерами «звездочка» обозначены интервалы между пакетами внутри кластера. На обоих ри-

сунках длительности пакетов данных составляли приблизительно 0,49 с.

В таблице приведены сведения об интервалах времени между пакетами и кластерами, полученные из экспериментов по передаче данных на расстояния 504, 1002 и 2011 м. В третьей колонке, обозначенной литерой  $N$ , через наклонную черту приведено число пакетов, задаваемых при покластерной передаче, и число пакетов, задаваемых при по пакетной передаче данных.

Таблица

$D, м$	$T_{дп}, с$	$N$	$T_{2п}, с$	$T_{a1}, с$	$K_e^p$	$K_e^c$	$R$
123	0,494	10/1	0,166	0,095	0,6543	0,9498	1,4516
272	0,494	10/1	0,358	0,081	0,5295	0,9184	1,7345
504	0,502	10/1	0,679	0,110	0,3898	0,8646	2,2181
1002	0,511	10/1	1,351	0,104	0,2599	0,7784	2,9950
2011	0,490	10/1	2,710	0,119	0,1476	0,6340	4,2954

По данным таблицы на рис. 5 и 6 представлены экспериментальные зависимости коэффициентов  $K_e^c$  и  $K_e^p$  и их отношения на разных дистанциях связи. На рис. 6 данные таблицы представлены круглыми маркерами для покластерной передачи данных, и маркерами «звездочка» для по пакетной передачи данных.

Для обоих наборов построены аппроксимирующие кривыми (сплошная линия для покластерной передачи, штриховая – для по пакетной).

Из сравнения рис. 2 и 5 следует, что расчетные зависимости коэффициентов  $K_e^c$  и  $K_e^p$



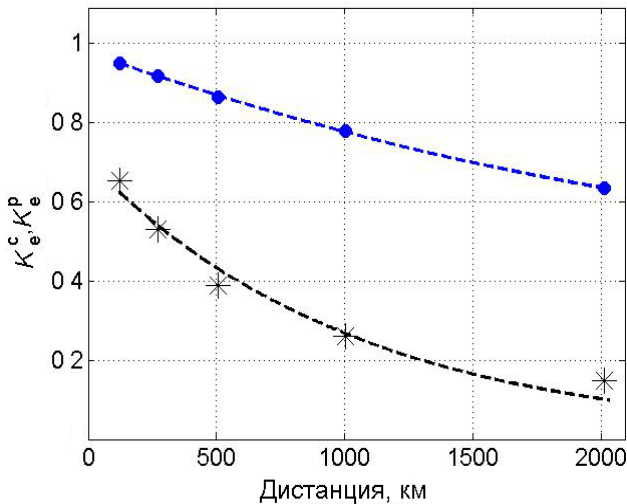


Рис. 5. Экспериментальные зависимости  $K_e^c$  и  $K_e^p$  от дистанции связи

хорошо согласуются с экспериментальными зависимостями на всех дистанциях связи. На рис. 6 круглыми маркерами отображены экспериментальные значения отношения  $K_e^c / K_e^p$  на различных дальностях связи. Аппроксимирующая (сплошная линия) и расчетная (штриховая) кривые имеют близкие значения отношения  $R$  на каждой дистанции связи.

Умеренные различия расчетных и экспериментальных значений коэффициентов  $K_e^c$  и  $K_e^p$ , а также их отношения  $R$ , можно объяснять незначительными отклонениями длительностей пакетов данных, использованных в эксперименте, от длительностей, задаваемых при расчете значений. Также, эти различия могут объясняться отклонением профиля вертикального разреза скорости звука в месте проведения экспериментов, от профиля идеализированного разреза, принятого при получении расчетных значений коэффициентов.

### Выводы

1. Большие задержки распространения г/а сигнала сильно ограничивают достижимую скорость передачи данных, требующих квитирования, а также делает применяемые, например, в радиосвязи или Интернете, протоколы обмена данными неэффективными (система связи вынуждена часто простаивать в режиме ожидания квитанции от принимающей стороны).

2. В работе представлен альтернативный сценарий обмена данными, в котором за один раз передается не пакет, а группа пакетов данных. В ответ на передачу группы пакетов, система ожидает приема составной квитанции о

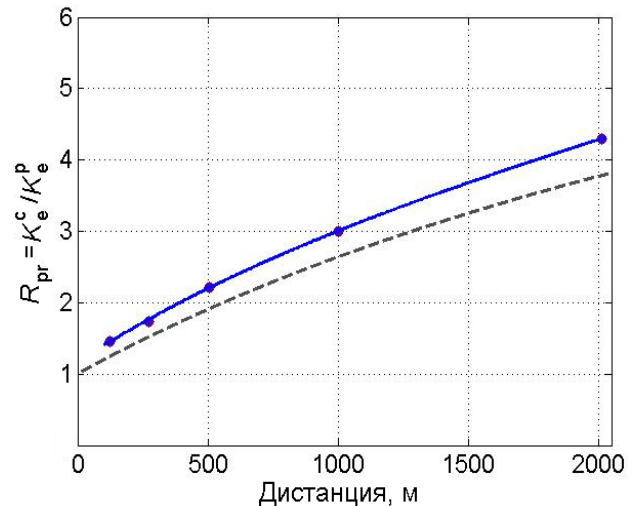


Рис. 6. Экспериментальные значения отношения  $R$  на разных дальностях связи

целостности данных в каждом из пакетов группы. При этом среднее время ожидания квитанции в пересчете на один пакет уменьшается и эффективность использования канала связи (коэффициент заполнения канала связи) растет. Пропорционально увеличению коэффициента заполнения канала связи возрастает эффективная скорость передачи данных.

### Литература

1. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь // Сети связи с кодовым разделением. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – С. 415–421.
2. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи // Некоторые перспективные системы радиосвязи. – М.: Эко-Трендз, 2005. – С. 353–385.
3. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 2001. – С. 132–177.
4. Убайдуллаев Р.Р. Протяженные ВОЛС на основе EDFA // Lightwave Russian Edition. – 2003. – № 1. – С. 22–28.
5. Кошелев А., Фильчаков А. Оптоволоконные сети и технология DWDM // Компьютер Пресс. – 2001. – № 1. – С. 1–12.
6. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и применение: Пер. с англ. Е.Г. Гроза, В.В. Марченко, А.В. Назаренко, О.М. Ядренко. – 2-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
7. Kilfoyle D.B., Baggeroer A.B. The state of the art in underwater acoustic telemetry // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2000. – Vol.25, № 1. – P. 4–7.
8. Kebkal K.G., Bannasch R., Kebkal A.G. Ultra



sonic Link for Improved Incoherent Data-Transmission in Horizontal Shallow Water-Channels // Proceedings OCEANS 2003 (22–26 September 2003). – San-Diego, 2003. – P. 1786–1792.

9. *Stojanivic M., Catipoivic J.A., Proakis J.G.* Phase-Coherent Digital Communications for Underwater Acoustic Channels // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 1994. – Vol. 19. – P. 100–111.

*НИЦ Вооружённых сил Украины «Государственный океанариум» г. Севастополь*

*Поступила в редакцию 24 октября 2008 г.*

## Проблемы подготовки специалистов

УДК 621.375

А.В. Борисов, канд. техн. наук, С.В. Воеводин, Т.Л. Волхова, канд. техн. наук,  
В.Г. Тиняков, канд. техн. наук.

### Имитационное моделирование и виртуальные измерения в лабораторном практикуме

Рассмотрено место лабораторного практикума в учебном процессе по естественно-научным дисциплинам, его значение в инженерном образовании, разнообразные возможности современного практикума в твердотельной электронике, микроэлектронике: имитационное моделирование физических процессов, виртуальные измерительные приборы (NI LabVIEW), программно-аппаратные комплексы (NI ELVIS, PSoC), проектирование в программных средах (полупроводниковые приборы, микросхемы, печатные платы).

Показано, что имитационное моделирование физических процессов в сочетании с виртуальными измерительными приборами и средствами компьютерного проектирования дают ранее не достижимые возможности, как в учебном процессе, так и в продвижении новых разработок к рынку.

There is considered the place of laboratory practical work in an educational process in the natural cause disciplines and its importance in engineering education. It was given diversified capabilities of contemporary laboratory practical work in solid state electronic, microelectronic, such as: simulation of physical processes, use virtual instruments (NI LabVIEW), work with firmware (NI ELVIS, PSoC), designing in software environment (semiconductor devices, integrated circuits, printed circuit boards).

It is showed that simulation of physical processes in combination with virtual instruments and a designing in software environment provides never before available possibilities in academic process as well as in promoting new engineering development to market.

**Ключевые слова:** лабораторный практикум, имитационное моделирование, виртуальный измерительный прибор, программно-аппаратный комплекс, приборно-технологическое моделирование, схемотехническое моделирование, твердотельная электроника, микроэлектроника, simulation, virtual instrument, VI, NI LabVIEW, NI ELVIS, NI Multisim, SPICE, TCAD.

#### Введение

Лабораторный практикум в учебном процессе занимает особое место, соответствуя этапам наблюдения, эксперимента и практического использования в научном методе познания. Поэтому учебный процесс, как и процесс научного познания, нельзя считать завершенным без практикума (рис. 1). Лабораторный практикум даёт возможность приобрести необходимые умения и навыки будущему инженеру и способствует созданию фундамента для исследовательской и творческой деятельности будущего учёного.



Рис. 1. Место лабораторного практикума в учебном процессе

Компетентностный подход в подготовке современного инженера-исследователя предполагает не только овладение определённым объёмом знаний, умений и навыков, а и умением мобилизовать и использовать их для решения возникающих задач. Одним из примеров такого подхода является инициатива CDIO (си-ди-ай-оу): «Conceive, Design, Implement, Operate», или «Задумай, Спроектируй, Сделай, Используй» [1]. Её основные черты – приобретение навыков и компетенций, необходимых для работы в науке и промышленности ещё в процессе учёбы. Для этого значительное время учебного процесса отводится на решение практических задач с широким использованием лабораторного оборудования, виртуальных измерительных

приборов, сред имитационного моделирования и компьютерного проектирования; выработке навыков работы в команде (творческом коллективе). При этом перечень требуемых компетенций формируется путём опроса ведущих специалистов в соответствующей области научных исследований, инженерных разработок, образования.

Практической работе и анализу будущей деятельности обучаемого большое значение придаётся в педагогическом направлении «Деятельностный подход в обучении» [2].

Остаются также по-прежнему актуальными исторически ранее сложившиеся методики, например система практической подготовки инженеров Императорского московского технического училища (ИМТУ). В 1876 году на Филадельфийской Всемирной Выставке эта система была удостоена медали. Директор Бостонского Технологического Института, профессор Ронкль докладывал: «... за Россию признали полный успех в решении столь важной задачи технического образования, ... и в Америке после этого никакая иная система не будет употребляться...». Представленная русская методика обучения инженеров имела три основных составляющих:

- глубокая практическая подготовка, основанная на работе студентов в условиях, максимально приближенных к тем, с которыми им после придётся иметь дело на заводах и фабриках;
- серьёзное изучение теоретических предметов на уровне, не уступающем преподаванию этих же предметов в классических университетах;
- постоянная взаимовыгодная связь Высшей технической школы с промышленностью.

Отличительными особенностями выпускников ИМТУ стали: сочетание практических умений с основательной теоретической подготовкой, способность решать новые, неизвестные ранее задачи. Не случайно долгие годы практически вся инженерная элита России (и в последствии СССР) состояла из выпускников ИМТУ-МВТУ (переименовано в Московское высшее техническое училище) [3].

Инновационное развитие современной экономики предусматривает быстрый путь от идеи до коммерчески окупающегося проекта. В области высоких технологий такой путь возможен при эффективном использовании имитационного моделирования на всех этапах разработки [4]. В микроэлектронике это реализуется трёхмерным физико-технологическим моделированием элементной базы интегральных

схем (ИС), схемотехническим моделированием ИС, компьютерным топологическим проектированием с последующей верификацией (в проектировании ИС – процедура обеспечения надёжного и непрерывного контроля соответствия текущих проектных данных проектному заданию). Лабораторный практикум, ориентированный на воспроизведение последовательности этих этапов в учебном процессе, позволяет готовить будущего специалиста к деятельности в высокотехнологичных компаниях, занимающихся современными разработками.

Непрерывное совершенствование лабораторно-измерительного оборудования, его разнообразие и всё возрастающая сложность, а также, как следствие, рост затрат на его приобретение, поставило перед учебными и исследовательскими лабораториями сложные задачи по выбору и освоению нового оборудования.

Цель работы – показать место лабораторного практикума в учебном процессе и его значение в инженерном образовании, а также возможные виды деятельности в лабораторном практикуме по направлениям: твердотельная электроника, микроэлектроника с использованием современных технических и методических средств.

## 1. Имитационное моделирование

Исследование математических моделей, как составной части научных теорий, является важным этапом процессов познания и обучения. Имитационное моделирование является частным случаем математического моделирования и позволяет исследовать не само явление, а его имитационную модель – логико-математическое описание объекта, которое может быть использовано с целью проектирования, анализа и оценки его функционирования. Удачное сочетание графического программирования, удобного ввода данных, скоростных вычислений, анимации и наглядного представления результатов позволяет создавать убедительную иллюзию наблюдения физических процессов (иногда в режиме реального времени) с точной имитацией поведения реальных объектов. Такая совокупность методов и средств, обычно называемая «simulation», соответствует современному представлению об имитационном моделировании.

Моделирование сложных систем предусматривает наличие моделей компонентов и алгоритмов их взаимодействия. Модели компонентов могут быть как аналитическими, так и заимствованными из результатов экспериментальных исследований. Программные пакеты имитационного моделирования отличаются те-

математической направленностью, способами построения, целями последующего использования [5].

В электронике наиболее востребовано имитационное моделирование технологических процессов, приборов, схем. Одно- и двухмерное моделирование постепенно уступает место более совершенному трёхмерному. Использование качественного имитационного моделирования позволило создавать программные среды проектирования, являющиеся ключевым инструментом современного разработчика.

### 1.1. Средства имитационного моделирования в электронике

Такие широко известные пакеты, как Mathcad, Simulink, MATLAB & Simulink, VisSim, в значительной мере универсальны, могут быть применены к моделированию широкого круга явлений, сохраняют «прозрачность» математических моделей и их логики.

Однако в электронике получили распространение и зарекомендовали себя среди специалистов программы, имеющие более узкую специализацию. В области **технологического моделирования** известны такие программы, как:

- SUPREM – одномерное моделирование технологических процессов полупроводниковой и интегральной электроники, (Стэндфордский Университет, США).
- TSUPREM-4 – двухмерное моделирование технологических процессов изготовления полупроводниковых приборов, включающее ионную имплантацию, разгонку в инертной среде, окисление кремния и поликремния, диффузию и распределение примесей, эпитаксию, низкотемпературные процессы напыления и травления различных материалов (Synopsys, США).

В области **приборного моделирования** известны такие пакеты, как:

- PISCES-(2B-ET) – программа моделирования полупроводниковых приборов, используемая в разработке ИС с полевыми и биполярными компонентами, с двухмерным распределением потенциала и носителей заряда, построением электрических характеристик и учётом влияния на них внешних факторов (Стэндфордский Университет, США).
- DAVINCI – программа для разработки биполярных и полевых ИС, моделирует трёхмерное распределение потенциала и носителей заряда, строит электрические характеристики с учётом влияния внешних фак-

торов.

- ISE-программы – GENESISe, основная программа-интегратор, управляющая симулятором процессов и приборов, SPICE-экстрактором и инструментами оптимизации (ISE – International Society of Electrochemistry, Швейцария, компания основоположник программы приборно-технологического моделирования TCAD).

Большинство программ **схемотехнического моделирования** основано на алгоритмах и исходных текстах программы SPICE2G6, созданных в «The University of California», Berkeley (Калифорнийский университет в Беркли) и имеют сохранившийся с момента создания и ставший неофициальным стандартом входной язык описания схем, позволяющий называть их «SPICE-подобными» средствами схемотехнического моделирования. Это программные пакеты HSPICE (Meta-Software, Inc.), Spectre, PSPICE (Cadence), Eldo (Mentor Graphics), SmartSpice (Silvaco), Saber, ADS, Berkeley SPICE, Dr.Spice, SMASH, SPICE3, HSIM, (NASSDA Corporation), и, наконец, UltraSim (Celestry), позволяющий оперировать 1 миллиардом транзисторов для устройств памяти на SPICE-подобном уровне детализации.

Имитационное моделирование в электронике, зародившееся ещё в 60-е годы, в настоящий момент достигло уровня, который позволяет осуществлять огромную часть исследовательской работы по проектированию электронных схем без воплощения в реальные образцы. Изготовление первых образцов происходит уже с учётом результатов этих исследований, что позволяет исключить ошибки и неудачные решения и сэкономить значительные средства.

В отличие от профессиональных программных пакетов, предъявляющих жёсткие требования к надёжности, скорости, количеству моделируемых компонентов, имитационное моделирование в учебном процессе в большей степени нуждается в качественном графическом отображении и наглядности системы ввода информации и процесса ее обработки, наличии экспертной и справочной системы, имитации контрольно-измерительных приборов с удобным интерфейсом. Например, известный пакет OrCAD для начинающих может представлять определённые трудности в освоении. Более приспособленными для учебного процесса можно считать такие пакеты как MicroCap 8 (разработка фирмы Spectrum Software), DesinLab 8.0 (интегрированный пакет корпорации MicroSim), System View 1.9 (программа фирмы Elanix), CircuitMaker 6.0 (фирмы

MicroCode Engineering), NI Multisim (корпорации National Instruments).

Пакет программ имитационного моделирования в электронике NI Multisim является одним из мировых лидеров в образовательном направлении. Этот пакет (ранее Electronics Workbench) уже много лет востребован не только на рынке образовательного программного обеспечения (ПО), но и занял прочные позиции в области профессиональных разработок сложных электронных устройств. Его важнейшие особенности:

- интуитивно понятный редактор ввода схем, экономящий время для творчества в конструировании;
- смешанное цифровое и аналоговое проектирование;
- широкий набор виртуальных измерительных приборов, напоминающих реальные образцы;
- элементная база из 16 000 деталей, включающая: 1) имитационную модель, 2) схематический символ, 3) электрические параметры, 4) макет для разводки;
- бесплатный доступ к центру конструирования Design Center (более 12 миллионов элементов из поисковой базы данных);
- возможность как идеального так и реального моделирования (реального – основанного на SPICE моделях реальных приборов; идеального – на моделях, созданных пользователем);
- единственный общецелевой имитатор для использования с частотами свыше 100 МГц;
- возможность групповой работы конструкторов над одним проектом в режиме реального времени через локальную сеть или Интернет;
- возможности «сквозного проектирования» (в сочетании с продуктом Ultiboard позволяет закончить разработку топологией печатной платы);
- возможности реализации замкнутого цикла разработки (Multisim+LabVIEW – имитационная модель, воплощение в реальный образец, виртуальные измерения на реальном объекте, возврат к имитационной модели для анализа расхождений).

Multisim поддерживает симуляцию схем с использованием языков VHDL (Very high speed integrated circuits Hardware Description Language) и Verilog. MultiVHDL может использоваться в процессе обучения VHDL-программированию в качестве автономного приложения, или вместе со SPICE-симулятором Multisim. Опыт работы с Multisim в дальнейшем позволяет пользователю

без особых затруднений освоить другую среду разработки, базирующуюся на SPICE-моделях.

## 1.2. SPICE-модели

Все перечисленные выше пакеты схемотехнического проектирования используют SPICE-модели элементов. Программа SPICE (спайс) – Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis, или программа моделирования, ориентированная на интегральные схемы, используется уже свыше тридцати лет, и стала стандартом де-факто в электронике [6]. Описание моделей SPICE первоначально было сделано в текстовом формате (в настоящий момент встречается использование языка программирования C++, а также преобразование в формат \*.dll – Dynamic Link Library). В основу SPICE-модели компонента заложены простые принципы. В названии компонента должен быть отображён его тип (резистор, диод, транзистор и т. д.), название модели, а в описании – важнейшие электрофизические параметры. Для описания схемы соединения компонентов используется нумерация узлов схемы, к которым принадлежат выводы компонентов. Узел «земля», относительно которого будут отсчитываться потенциалы остальных узлов, должен иметь номер «0», номера остальных узлов – в произвольном порядке.

Среда Multisim снабжена удобным средством для анализа и редактирования сложных SPICE-моделей элементов, например для диода (рис. 2).

Использование конструктора позволяет пользователю самостоятельно создавать SPICE-модели элементов, добиваясь их максимального соответствия по параметрам реальным компонентам.

## 1.3. TCAD моделирование

Создание SPICE-моделей не учитывает тонких физических явлений, происходящих в активных областях полупроводниковых приборов, размеры которых иногда находятся за субмикронным барьером. Необходимость учёта большого числа конструктивно-технологических и внешних факторов, влияющих на работу электронных устройств (размеры, параметры материала, распределение примесей, температура, ионизирующие излучения), необходимость прогнозировать поведение прибора в условиях, которые ранее не исследовались, – все это требует построения полной трехмерной физико-технологической имитационной модели прибора, в которой учтены физические законы, описывающие поведение носителей электрическо-

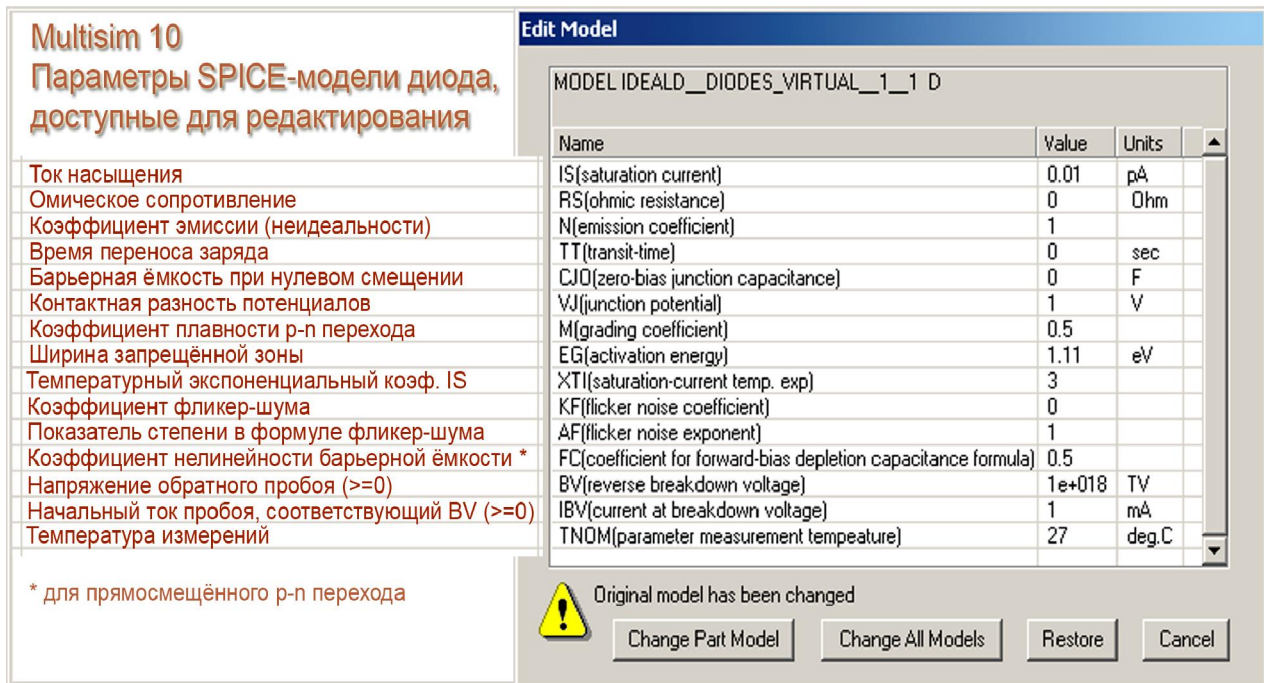


Рис. 2. Редактирование SPICE-модели диода в NI Multisim

го заряда. Эволюция имитационного моделирования технологических процессов и полупроводниковых приборов привела к интеграции этих двух направлений. Такой подход реализован в приборно-технологическом моделировании TCAD (ти-кад) – Technology Computer Aided Design. С помощью программного комплекса Sentaurus TCAD компании SYNOPSIS (синopsis), в котором использованы наработки компании ISE (см. выше), удалось рассчитать основные параметры интегральных компонентов и спроектировать базовые технологии современного рынка микроэлектроники (или подтвердить расчеты для более ранних разработок). Важным этапом TCAD-моделирования является процедура генерации SPICE-модели прибора для последующего использования в схемотехническом моделировании [7].

Компания Silvaco Inc (США) предлагает аналогичные подходы. Ее программные пакеты ATLAS и ATHENA предоставляют лёгкие в использовании, модульно расширяемые платформы для моделирования.

ATLAS – двух- и трехмерное имитационное моделирование полупроводниковых приборов, их электрических, оптических свойств, температурного и временного дрейфа, основанное на физических процессах, происходящих в приборах. Применяется для анализа на постоянном и переменном токе для всех полупроводниковых технологий.

ATHENA – имитационное моделирование процесса изготовления полупроводниковых приборов – ионной имплантации, диффузии,

травления, напыления, литографии, окисления полупроводниковых материалов. Это заменяет дорогие эксперименты с кремниевыми пластинами, сокращает цикл разработки.

Традиционные модели транспорта для полупроводниковых устройств трактуют электроны и дырки как классические частицы. TCAD-моделирование использует именно такое классическое приближение. Однако, при уменьшении размеров приборов до нанометров, граница между прибором и материалом становится расплывчатой. Квантовомеханические эффекты структуры материала начинают доминировать над характеристиками самого прибора. Компания Southnovel, занимающаяся разработкой программного обеспечения для моделирования полупроводниковых приборов, разработала Aeneas – передовую программу для моделирования квантового транспорта в трехмерных полупроводниковых устройствах из органических и неорганических материалов с использованием метода Монте-Карло. С помощью программы Aeneas были успешно смоделированы некоторые наноприборы.

Следует отметить, что трёхмерное моделирование поглощает значительные компьютерные ресурсы, сложность таких программ высока, они принадлежат к категории дорогих лицензионных программ специального назначения. Некоторые возможности TCAD-моделирования показаны на примере нескольких этапов проектирования перспективного FinFET-транзистора (рис. 3).

Более подробно с приведенной технологией можно ознакомиться в статье [7].



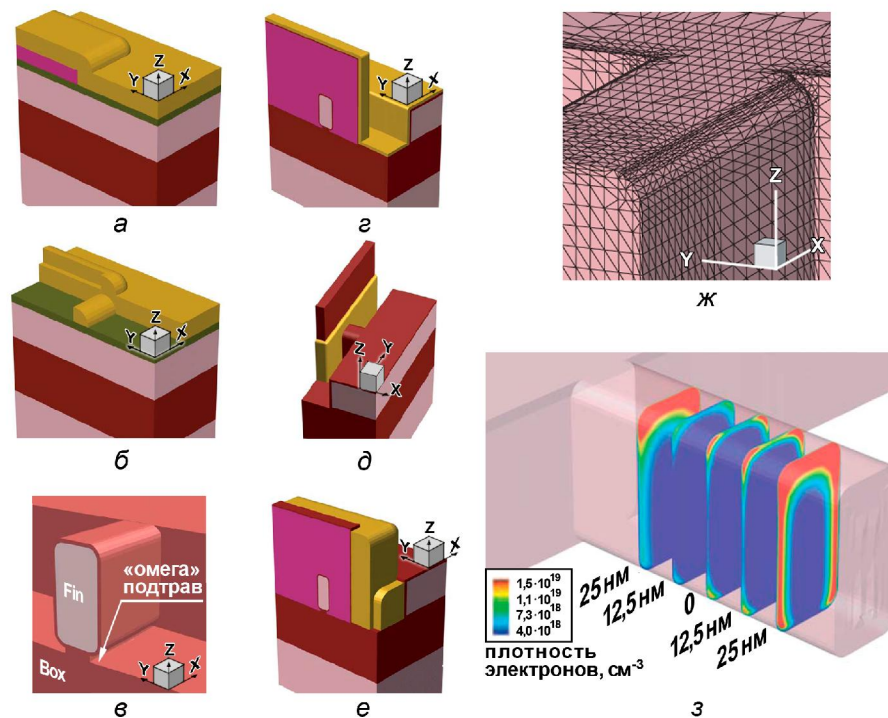


Рис. 3. Структура перспективного *Omega* FinFET транзистора на различных этапах моделирования: а – после эпитаксии и первой фотолитографии; б – после литографии для формирования окон стока/истока; в – после формирования FinFET-канала; г – после анизотропного нанесения нитрида, до формирования слаболегированного стока; д – после формирования слаболегированного стока; е – после имплантации стока/истока; ж – трёхмерная сетка фрагмента канала прибора; з – распределение плотности электронов вдоль канала транзистора

## 2. Программно-аппаратные комплексы

### 2.1. Виртуальные измерительные приборы

Эволюция измерительных приборов от простого отображения измеряемой величины к сложной обработке измерений, передаче информации через компьютерные сети шла через появление сначала выхода на com-порт, затем на USB шину компьютера с сохранением шкалы или цифрового табло части прибора. Приборы, для которых показывающая часть непосредственно в месте измерений не обязательна, утратили эти элементы конструкции, непосредственно на месте измерений осталась сенсорная часть и аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи (АЦП/ЦАП). Обработка полученного сигнала и средства его отображения переместились в компьютер. Закрепившееся за такими приборами название «виртуальный прибор» (ВП), а в англоязычном варианте «Virtual Instrument» (VI) – подразумевает работу не только с источниками реальных сигналов, но и с их имитацией программами имитационного моделирования.

Созданные для профессионального использования, виртуальные измерительные приборы

удачно интегрируются в учебный процесс. Популярной средой, используемой в университетах всего мира, стал программно-аппаратный комплекс виртуальных измерительных приборов NI LabVIEW (эн-ай лаб-вью) – National Instruments Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. Используемый в LabVIEW язык графического программирования «G» (джей) позволяет самостоятельно создавать интерфейс измерительных приборов и расширять их функциональные возможности, не требуя от пользователя квалификации программиста. При этом компактность кодов программы, автоматически генерируемой на языке «C» (си), ухудшается не более чем на 5 % в сравнении с «чистыми» кодами ручного программирования. За счет удачной концепции разработки приложений LabVIEW занимает более чем 70 %-й сегмент рынка в программировании для инженерных систем в промышленности, науке и образовании, потеснив программирование на **Visual Basic** и ручное программирование на языке **C**.

Доступность виртуальных приборов через компьютерные сети открывает широкие возможности для мониторинга, сбора данных и управления удаленными объектами.

Высокая востребованность предложенных решений сделала среду графического программирования LabVIEW стандартом де-факто в области разработки контрольно-измерительных и автоматизированных систем [8, 9]. Использование среды LabVIEW в лабораторном практикуме позволяет создавать и использовать различные приборы, например мультиметр, осциллограф, характериограф и другие, обладающие по сравнению с обычными, повышенной функциональностью и гораздо меньшей стоимостью (рис. 4).

Среда LabVIEW сочетает возможности проведения измерений на реальных объектах с широкими возможностями имитационного моделирования. В учебном процессе часто используются лаборатории, полностью основанные на имитационном моделировании – их иногда называют виртуальными лабораториями.

Программно-аппаратный комплекс LabVIEW является плодом более чем 20-летней деятельности корпорации National Instruments и применяется в таких направлениях как:

- Сбор и обработка данных, автоматизация эксперимента – проведение широкого спектра измерений, в том числе температурный мониторинг, виброакустическая диагностика для настольных, портативных, распределенных приложений.
- Электротехника, схемотехника, радиотехника – с широкими возможностями интеграции NI Multisim, NI LabVIEW и NI ELVIS для разработки, моделирования, прототипирования и тестирования электронных схем.
- Разработка систем управления, моделирование, мехатроника – включая разработку контроллеров, моделирование динамических систем, идентификацию систем и использование оборудования реального времени для создания готовых решений.

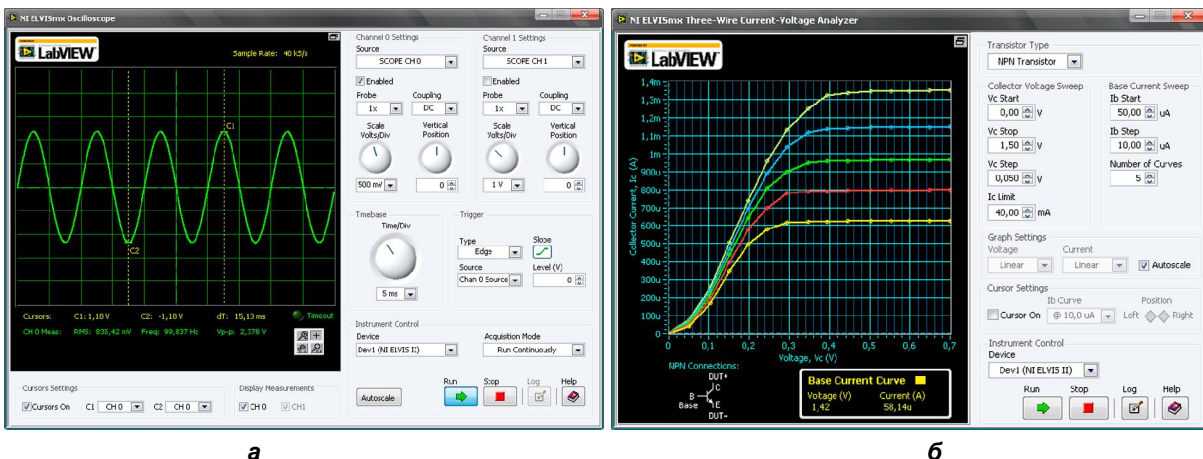
- Цифровая обработка сигналов и изображений – изучение основ цифровой обработки сигналов, начиная от интерактивной разработки цифровых фильтров и заканчивая созданием образцов сигнальных процессоров на базе платформы NI.
- Системы телекоммуникаций ВЧ диапазона – с использованием инструментов графического программирования в сочетании с современным высокоточным оборудованием для практического изучения и инновационных исследований в области беспроводных телекоммуникаций.
- Диагностика машин и механизмов – для изучения основ диагностики различных механизмов с использованием мощных инструментов графического программирования в сочетании с современным виброакустическим оборудованием.

С помощью LabVIEW можно управлять специальным оборудованием, в том числе:

- системой сбора данных;
- реконфигурируемыми ПЛИС-системами ввода/вывода;
- технологиями RIO/CompactRIO – (Reconfigurable Input/Output – программируемый контроллер управления технологическими процессами на базе ПЛИС. CompactRIO – независимый компактный блок RIO);
- системами с программируемой логикой PXI/CompactPCI.

Кроме среды графического программирования LabVIEW может быть снабжен:

- набором специального программного обеспечения для разработчиков NI: Developer Suite;
- средствами разработки приложений для Visual Studio .NET, Visual C++ и Visual Basic - Measurement Studio;
- средой разработки приложений на базе



а

б

Рис. 4. Виртуальные измерительные приборы, созданные в среде LabVIEW: а – осциллограф; б – характериограф



- ANSI C - LabWindows/CVI;
- интерактивным программным обеспечением для проведения измерений – Signal Express;
- интерактивным анализом данных и генерацией отчетов – DIAdem;
- разработкой и моделированием системы управления – MATRIXx.

Использование среды виртуальных измерительных приборов и имитационного компьютерного моделирования в масштабных научно-технических проектах, например, в проекте «Иридиум» (система глобальной спутниковой связи) дало возможность снизить затраты на исследование и разработку практически на 90 %, ускорить введение системы в действие, значительно улучшить взаимодействие многих участников проекта. Это делает средства компьютеризации измерений и моделирование важным экономическим фактором в современных научно-технических разработках.

## 2.2. Лабораторная платформа NI ELVIS

Программно-аппаратный комплекс NI LabVIEW в сочетании с лабораторной платформой NI ELVIS (эн-ай элвис) – NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite, или комплект виртуальных измерительных приборов для учебных лабораторий, позволяет, используя многофункциональную плату ввода/вывода, макетный коннектор, виртуальные измерительные приборы, производить измерения характеристик реальных электронных компонентов и схем, обучать студентов работе с приборами различного типа – как обычными, с управлением ручками на лицевой панели, так и программно

управляемыми, виртуальными, работающими в среде NI LabVIEW (рис. 6).

Схемотехническое моделирование в Multisim, а затем передача результатов в приложение UltiBoard для проектирования печатной платы позволяет реализовать принцип сквозного проектирования – от замысла до изготовления образцов.

Совместное использование программы схемотехнического имитационного моделирования Multisim и программно-аппаратного комплекса LabVIEW позволяет осуществить замкнутый цикл проектирования, воспроизводя основные этапы современных разработок, а именно:

1. моделирование, например, схемотехническое моделирование в Multisim, PSPICE (писпайс);
2. измерения виртуальными приборами на реальном объекте (в среде LabVIEW);
3. сравнение параметров модели с результатами эксперимента;
4. оптимизация модели;
5. следующая итерация (повторение пунктов 1-4 до достижения желаемого результата).

Комбинация программы схемотехнического моделирования NI Multisim и виртуальных приборов NI LabVIEW обеспечивает разработчиков ранее недостижимыми возможностями для наблюдения влияния входных параметров на выходные, позволяет проводить сравнение параметров реального объекта и его имитационной модели, ускоряет поиск ошибок разработки или изготовления, а также облегчает настройку модели в соответствии с результатами реального эксперимента [10].

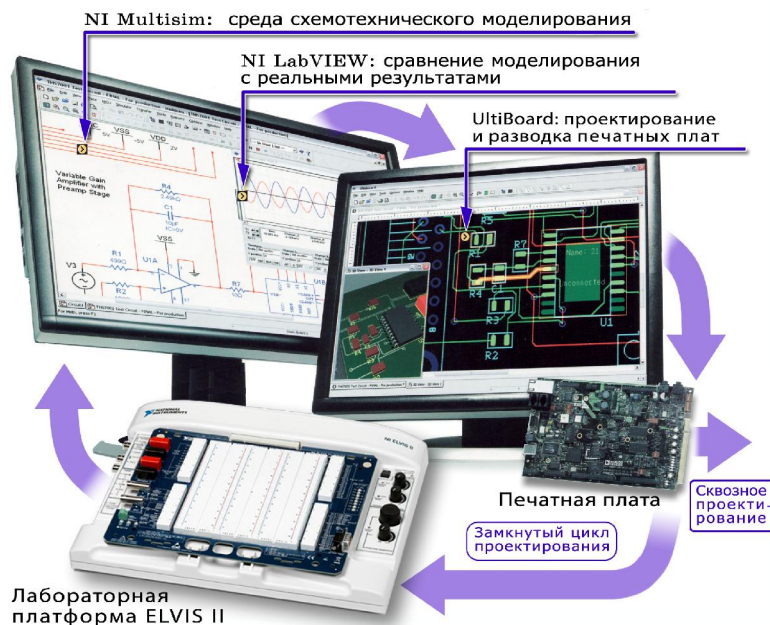


Рис. 6. Замкнутый цикл проектирования и сквозное проектирование с использованием лабораторной платформы ELVIS II

В качестве дальнейшего развития метода сквозного проектирования в учебном процессе по микроэлектронике и твердотельной электронике целесообразно проведение топологического проектирования электронных устройств в одном из специализированных графических редакторов с разработкой системы конструкторско-технологических ограничений.

### 2.3. PSoC – программируемая система на кристалле

Фирма Cypress (Сайприс) предложила свой вариант программируемой системы на кристалле: PSoC (пи-сок) – Programmable System on Chip, отличающийся от подобных систем в классическом представлении (как, например, у компании Altera). PSoC от Cypress – это конфигурируемый массив обработки аналоговых и цифровых сигналов с интегрированным микроконтроллером и набором аналоговой и цифровой периферии (совокупности внешних устройств):

- таймеры/счетчики;
- широтно-импульсные модуляторы (ШИМ);
- универсальные асинхронные приемопередатчики UART (с режимами работы Full-Duplex, Half-Duplex);
- интерфейс SPI;
- АЦП и ЦАП;
- аналоговые фильтры (например, ФНЧ);
- инструментальные усилители (ОУ) и т. д.

Наличие внешних компонентов удорожает систему, их стоимость может превышать стоимость микроконтроллера. В PSoC внешние компоненты интегрированы в микроконтроллер и представляют собой массив (или матрицу) не связанных между собой аналоговых и цифровых элементов, которые при включении питания конфигурируются управляющим механизмом в соответствии с требованиями пользователя (рис. 7).



Рис. 7. Обычное схемное решение и вариант с PSoC микроконтроллером для схемы управления выходными приборами по сигналу сенсора (светодиоды и звуковой сигнал)

Получается аналог классической микросборки, которую очень легко подвергнуть динамическому переконфигурированию непосредственно во время работы, для чего в PSoC достаточно изменить значения специальных динамических регистров, определяющих внутреннюю текущую архитектуру прибора, после чего его внутренняя организация изменится, и он начнет выполнять совершенно иные функции.

PSoC снабжен средой разработки PSoC Express, не требующей от пользователя квалификации программиста, код на языке «С» создается системой автоматически, аналогично тому, как это делается в NI LabVIEW. Визуальная среда программирования PSoC Designer содержит Device Editor (редактор устройств), Application Editor (редактор приложений), Debugger (отладчик). За счет полного или частичного отказа от дополнительных внешних цифровых и аналоговых элементов системы фирме Cypress Semiconductor удалось еще больше миниатюризировать аппаратуру (рис. 8), одновременно снизив её стоимость [11, 12].

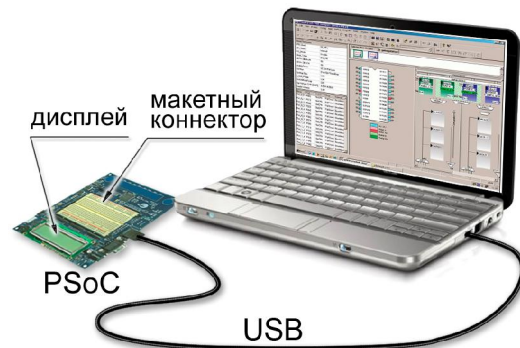


Рис. 8. Аппаратная часть PSoC на рабочем столе

Аппаратная часть PSoC содержит макетный коннектор для размещения навесных компонентов схемы, дисплей, разъёмы для подключения внешних устройств. Использование программно-аппаратного комплекса Cypress PSoC в учебном процессе позволяет проводить проектирование, исследование и моделирование электронных микроконтроллерных систем непосредственно в компьютерном классе.

### 3. Примеры использования имитационного моделирования и виртуальных измерительных приборов в учебном процессе

В качестве примера использования виртуальной лаборатории в среде NI LabVIEW можно привести лабораторную работу «Испытание магнитомягких материалов импульсно-индукционным методом на постоянном токе», реализованную в среде LabVIEW (рис. 9) [13].

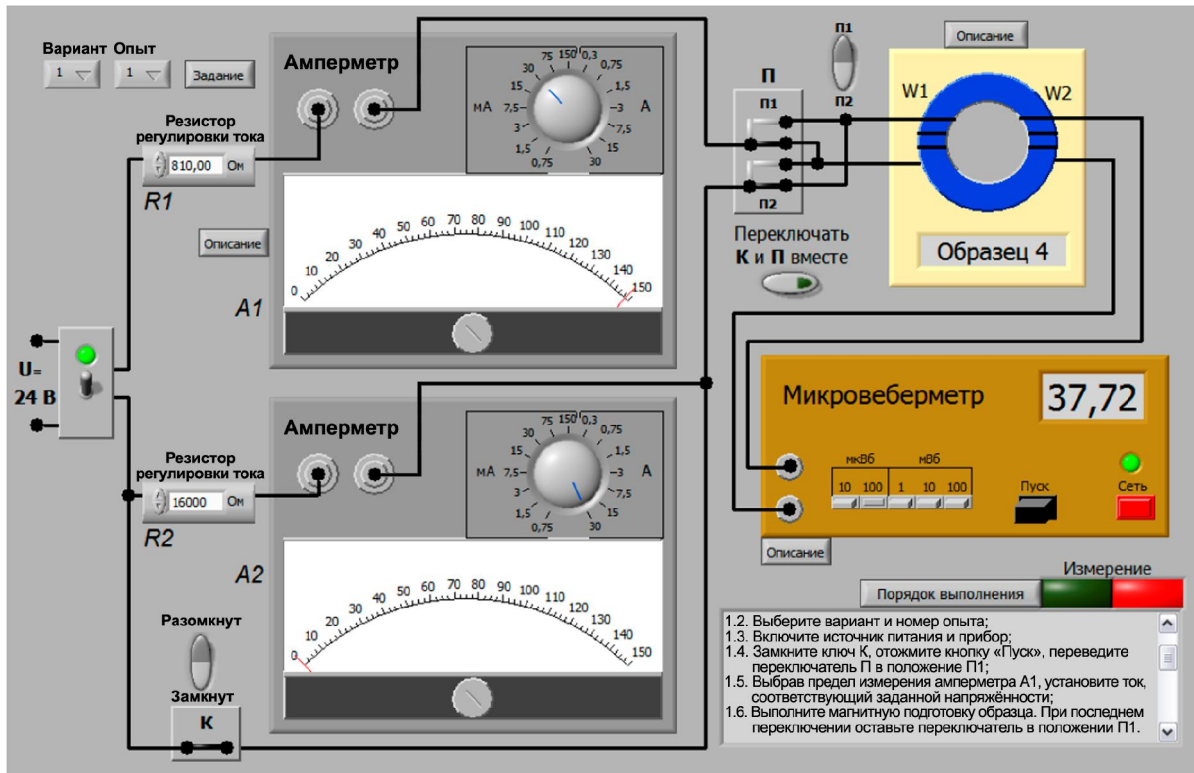


Рис. 9. Виртуальный лабораторный стенд

При этом для идентификации моделей могут быть использованы экспериментальные данные, полученные на реальных объектах.

В качестве примера использования имитационного моделирования в среде Multisim может служить моделирование комбинацион-

ных логических схем в компьютерной схемотехнике [14]. Для этого использованы такие приборы цифровой электроники как логический преобразователь, логический анализатор, генератор слов, логические индикаторы (рис. 10). В приведённом примере седьмой тест является

**Лабораторная работа. Монофункциональные схемы памяти. Монофункциональный многостабильный элемент памяти на 3 состояния.**

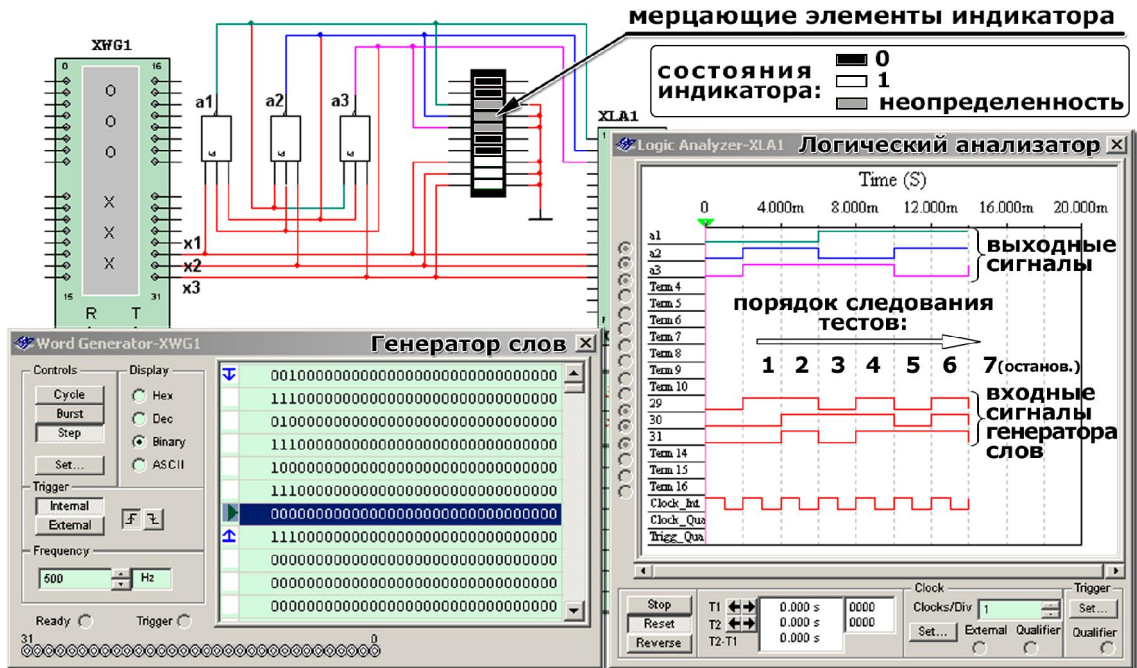


Рис. 10. Использование приборов цифровой электроники в Multisim



для данной логической схемы запрещённым словом, переводящим выход схемы в неопределённое состояние. В среде Multisim это сопровождается остановкой моделирования с мерцанием элементов индикатора. Опыт создания логической схемы и её исследования приборами цифровой электроники создаёт наглядную связь между модельными представлениями логической схемы и средствами их исследования, подготавливает учащегося к эксперименту с реальными компонентами.

Другим примером может служить исследование характеристик полупроводниковых диодов и транзисторов в курсе твердотельной электроники в разделе «Физика полупроводниковых приборов». В лабораторной работе «Исследование выпрямительных полупроводниковых диодов» вольт-амперные характеристики строятся при помощи измерений в цепи, содержащей исследуемый прибор, источник питания, мультиметр. Для изучения влияния температуры перед каждой новой серией измерений в SPICE-модель элемента вносится соответствующее изменение температуры (TNOM на рис. 2). Вольт-амперная характеристика может быть построена по точкам, а также отображена при помощи характеристикиографа. Показания характеристикиографа могут быть зафиксированы при помощи инструмента Multisim «Grapher» (рис. 11).

Управление такими параметрами модели, как ширина запрещённой зоны, концентрация собственных носителей, удельное сопротивление

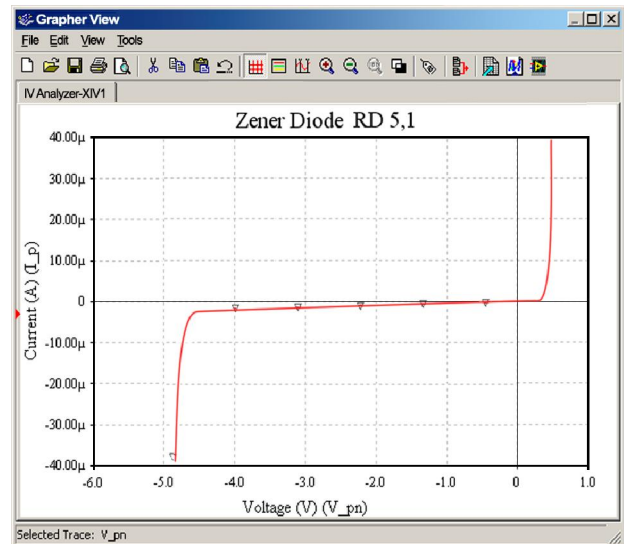


Рис. 11. Отображение ВАХ стабилитрона в Grapher Multisim

ние, позволяет исследовать модели компонентов, базирующиеся на различных материалах, например, кремнии, германии, арсениде галлия.

Пример использования виртуальных измерительных приборов и лабораторной платформы ELVIS II показан на рис. 12. Представленный прибор разработан на кафедре микроэлектроники НТУУ «КПИ» и предназначен для использования в практикуме по твердотельной электронике. При построении вольт-амперной характеристики диода для измерения тока используется падение напряжения на высокоомном резисторе.

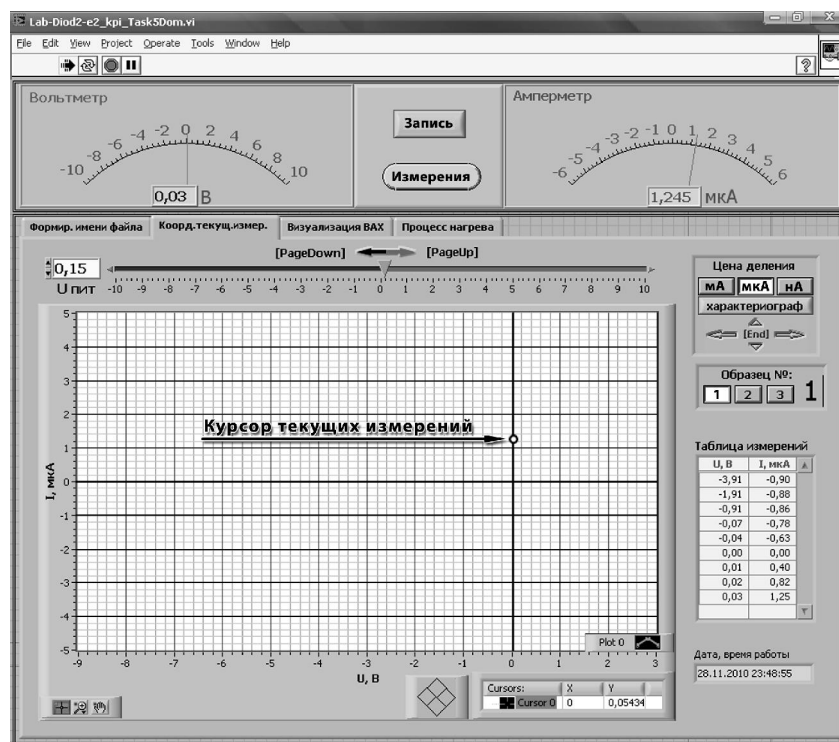


Рис. 12. Лицевая панель виртуального прибора в лабораторной работе «Исследование полупроводниковых диодов»

#### 4. Электронные образовательные ресурсы

Фиксация практикума в электронном виде предполагает создание электронного образовательного ресурса (ЭОР) [15]. Возможность повторного и регулярного использования ЭОР в учебном процессе, а также тиражирования позволяет повышать его эффективность, адаптируемость к различным технологиям обучения, в том числе с учётом степени подготовленности студента. ЭОР может быть эффективно использован и за пределами создавшего его учебного заведения.

При создании таких ЭОР уже нельзя не учитывать требований стандартов, регламентирующих жизненный цикл сложных комплексов программ и информационных систем (ЖЦ ПС) [16] и применяемых для обеспечения надёжности функционирования и безопасности использования, облегчения модернизации и развития версий. Например, Международный стандарт ISO/IEC 15288 «Системная инженерия – процессы жизненного цикла систем», предназначенный для любого рода систем, созданных человеком.

Использование решений, поддерживаемых и развиваемых крупными компаниями, способствует повышению надёжности и перспективности разрабатываемых учебных курсов, уменьшению риска утраты педагогических наработок по лабораторному практикуму. Деятельность таких компаний часто характеризуется накоплением большого опыта в избранном направлении, возможностью обеспечивать производство качественных и доступных электронных приборов, а также оказывать своевременную техническую и консультационную помощь потребителям.

#### 5. Повышение качества учебного процесса

Повышение качества учебного процесса путём использования персонального компьютера для проведения имитационного моделирования и виртуальных измерений стало одним из важных направлений в преподавании естественно-научных дисциплин. Углублённое изучение моделей физических явлений, а также постановка лабораторного практикума на реальных объектах с использованием виртуальных измерительных приборов подготавливает будущего специалиста к бесконфликтному вхождению в мир информационных технологий, позволяет изменить методологию лабораторной работы, приблизить её к исследовательской. Будущие инженеры приобретают навыки использования современных измерительных приборов и ком-

плексов, проектирования в программных средах, являющихся основным инструментом разработчика. Появляется возможность проведения более глубокого анализа получаемых данных и качественно нового усвоения методов и законов физики. Студент за короткий период времени может творчески проверить, осмыслить и усвоить важные для понимания закономерности, ассоциативно связать реальный прибор и его модельные представления.

Компьютеризация учебного процесса также позволяет расширить педагогические возможности использованием сред дистанционного обучения, обучающих программ, сетевого взаимодействия участников проекта, эффективных средств текущего и итогового контроля, сбора статистики параметров учебного процесса. Однако, как и любая инновация в учебном процессе, каждый из использованных приёмов нуждается в адаптации к конкретным условиям и оценке достигнутой эффективности. Следует также уделить внимание содержанию остаточных знаний, которые студент может использовать вне компьютерных сред (той части изученного материала, которая остается в памяти многие годы, имеет в своей основе три компонента: запоминание материала, его понимание и умение применять в практической или научной деятельности).

#### Выводы

1. Программы имитационного моделирования в электронике, охватывают весь процесс разработки ИС (TCAD, SPICE-Programs) и систем на их основе (NI LabVIEW). Приобретение компетенций в имитационном моделировании является обязательным для будущих специалистов.

2. В приборно-технологическом моделировании TCAD реализовано полное трехмерное физико-технологическое имитационное моделирование прибора с учётом физических законов, описывающих поведение носителей электрического заряда, что позволяет получить вольт-амперные характеристики, температурный и радиационный дрейф параметров, а также сгенерировать SPICE-модель прибора.

3. Имитационное моделирование в электронике, основывающееся на SPICE-моделях, позволяет получить характеристики устройства ещё на этапе его проектирования; первоначально ориентированное на ИС, оно успешно применяется и в разработке сложных многокомпонентных электронных устройств.

4. Программно-аппаратные комплексы, позволяющие использовать виртуальные измери-

тельные приборы для исследования реальных объектов, позволяют ускорить процесс разработки электронных устройств и сделать более эффективным и экономным учебный процесс. Среда разработки и виртуальные приборы NI LabVIEW могут быть использованы для широкого круга научно-технических направлений и учебных дисциплин.

5. Лабораторная платформа NI ELVIS содержит устройство сбора данных, макетный коннектор, программируемый источник питания, генератор функций, разработанный набор из 14 виртуальных измерительных приборов и в сочетании с программной средой NI LabVIEW может быть успешно использована в учебном процессе для изучения электронных компонентов и устройств на их основе в ряде дисциплин.

6. Программно-аппаратный комплекс PSoC от компании Cypress, представляющий собой конфигурируемый массив обработки аналоговых и цифровых сигналов с интегрированным микроконтроллером и набором аналоговой и цифровой периферии, снабжён средой разработки PSoC Express, не требующей от пользователя квалификации программиста. В учебном процессе PSoC позволяет проводить проектирование, исследование и моделирование электронных микроконтроллерных систем непосредственно в компьютерном классе.

Совместное использование виртуальных измерительных приборов и имитационного моделирования даёт возможность сэкономить значительные средства, которые потребовались бы на покупку обычных приборов. Учебный процесс, дополненный использованием средств компьютерного проектирования и моделирования, позволяет воспроизвести важнейшие этапы разработки современных электронных устройств, реализовать компетентностный подход в обучении, активизировать умения и навыки, необходимые в инженерной и научной деятельности.

## Литература

1. CDIO Home Page. About CDIO™. – [http://www.cdio.org/about\\_cdio/about\\_1\\_cdio.html](http://www.cdio.org/about_cdio/about_1_cdio.html)
2. Атанов Г.А. Деятельностный подход в обучении. – Донецк: ЕАИ-пресс, 2001. – 160 с.
3. Волчков И.Л. Очерки истории МВТУ. – М.: Машиностроение, 2000. – 239 с.
4. Палташев Т.Т. Гражданская электроника как основа инновационной экономики России. Взгляд из Кремниевой долины // Промышленные ведомости. – 2007. – № 3. – <http://www.promved.ru/articles/article.phtml?id>

5. Денисенко В.В. Проблемы схемотехнического моделирования КМОП СБИС // Компоненты и технологии. – 2002. – № 3. – С. 74–78. ([http://www.compitech.ru/html.cgi/архив/02\\_03/index.htm](http://www.compitech.ru/html.cgi/архив/02_03/index.htm))
6. Spice 3 version 3f3. User's Manual / T. Quarles, A.R. Newton, D.O. Pederson, A. Sangiovanni-Vincentelli // Department of Electrical Engineering and Computer Sciences. – University of California, Berkeley, Ca., 94720, 1993. – 146 p.
7. Тихомиров П., Пфеффли П., Зорзи М. Система Sentauros TCAD компании SYNOPSIS. Новое поколение приборно-технологических САПР // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2006. – № 7. – С. 89–95.
8. Тревис Д., Кринг Дж. LabVIEW для всех. – 3-е изд., перер. и доп. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 880 с.
9. Шарапов А.Д., Воеводин С.В., Махоткина А.Я. Новые информационные технологии в лабораторном практикуме // Новые информационные технологии в образовании для всех: Материалы Первой Международной конференции (29–31 мая 2006 г.). – Киев, 2006. – С. 421–427.
10. Shauna L. Rae, Gretchen Edelman. Closing the Hardware Design Loop with Electronics Multisim and National Instruments LabVIEW. – 2006. – 4 p. – [http://www.ni.com/pdf/academic/us/closing\\_the\\_loop\\_with\\_labview\\_and\\_multisim.pdf](http://www.ni.com/pdf/academic/us/closing_the_loop_with_labview_and_multisim.pdf)
11. Скусов А. PSoC решения снижают стоимость миниатюрных систем // Электронные компоненты. – 2004. – № 7. – <http://www.rlocman.ru/shem/shemcache.html?di=18750>
12. PSoC Seminar / P. Kane // Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники». – 2008. – № 3-4. – 206 с.
13. Циделко В.Д., Потоцкий И.А., Бурченков Г.К. Затока С.А. Опыт использования NI LabVIEW для создания лабораторного практикума по измерениям магнитных величин // Труды образовательной конференции National Instruments. – М.: РУДН, 2007. – Секция 5. – Р. 10.
14. Мараховский Л.Ф., Шарапов А.Д., Воеводин С.В., Михно Н.Л. Имитационное моделирование цифровых логических схем и учебный процесс // Новые информационные технологии в образовании для всех: состояние и перспективы: Материалы Второй Международной конференции (21–23 ноября 2007 г.). – К.: IRTC, 2007. – С. 268–275.
15. Батоврин В.К., Бессонов А.С., Мошкин В.В. Опыт разработки открытых образовательных ресурсов на основе технологии виртуальных

- приборов // Открытое образование. – 2009. – № 5. – С.117–124.
16. Липаев В.В. Стандарты, регламентирующие жизненный цикл сложных комплексов программ информационных систем [Электронный журнал] // Инженерное образование. – 2005. – № 8. – <http://www.techno.edu.ru:16001/db/msg/26890.html>

*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»*

*Поступила в редакцию 1 октября 2008 г.*

## Краткие сообщения

УДК 681.3.07

В.Н. Бондаренко, канд. техн. наук, Н.А. Бондаренко

### Call-центр с поддержкой IP-телефонии на платформе Intel Dialogic

Описана структура Call-центра с интегрированным приложением IP-телефонии, который предназначен для обслуживания организаций, широко использующих в своей деятельности международную телефонную связь. Call-центр позволяет использовать услуги различных операторов IP-телефонии для оптимизации показателя стоимость-качество связи.

**The structure of Call-center with integrated IP-telephony application intended for the support of institutions widely using international telephone communications in their activity has been described. The Call-center allows to use a number of IP-telephony providers' services for the cost-quality of connection index optimization.**

**Ключевые слова:** *Call-центр, IP-телефония, Intel Dialogic, Интернет-телефония, компьютерная телефония, телекоммуникация, голосовая плата.*

#### Введение

Развитие компьютерной телефонии (КТ) ведет не только к улучшению обслуживания абонентов, рациональному использованию человеческих ресурсов для предоставления телекоммуникационных услуг, но также к снижению стоимости некоторых услуг при сохранении требований, предъявляемых к их качеству. Среди них важнейшее место занимают услуги междугородной и международной телефонной связи. Значение IP-телефонии или Интернет-телефонии [1] растет с каждым годом благодаря улучшению качества связи с одновременным снижением ее стоимости. Гибкость платформы Intel Dialogic [1] позволяет строить не только приложения IP-телефонии операторского уровня, но также расширять функциональность Call-центров или Центров обслуживания вызовов (ЦОВ), предоставляющих телекоммуникационные услуги корпоративным клиентам [2].

В работе описан аппаратно-программный комплекс (АПК) ЦОВ с интегрированным приложением IP-телефонии, в котором авторами предложено осуществлять автоматический контроль и поддержание качества связи, предоставляемой различными операторами, что позволяет оптимизировать показатель стоимость-качество связи.

#### Структура и функционирование аппаратно-программного комплекса центра обслуживания вызовов

АПК, структура которого приведена на рис. 1, построен на аппаратной платформе Intel Dialogic и включен в виде составной части в рабочую станцию. Платы, входящие в АПК, имеют разъемы для подключения к автоматической телефонной станции (АТС) либо непосредственно к телефонной сети. Функции ЦОВ обеспечивает голосовая плата либо плата с media-ресурсами [3], а обслуживание междугородных и международных вызовов выполняет плата Intel Dialogic для IP-телефонии типа DM/IP [3], которая подключена через шину КТ к голосовой плате. Платы функционируют как единое целое и управляются с помощью сервера и драйверов Intel Dialogic. Правила обработки вызовов заложены в ядре системы, а параметры, включенные в правила, определяются информацией, хранящейся в базе данных.

Доступ абонентов к услугам междугородной и международной связи осуществляется либо через голосовое меню ЦОВ, либо с помощью прямого номера доступа, обслуживаемого платой DM/IP. Использование голосового меню позволяет абонентам выбирать уровень качества предоставляемой услуги (бизнес-качество или стандартное), что, в свою очередь, приводит к различной маршрутизации и тарификации вызовов.

Как правило, операторы IP-телефонии, наряду с тарифами, предоставляют информацию об усредненном значении параметра ASR (Answer Seizure Ratio – коэффициент ответных вызовов), определенного Международным союзом электросвязи. ASR вычисляется как процентное отношение числа ответных вызовов к общему количеству вызовов в заданном направлении. Сведения о параметре ASR и тарифах позволяют:

- автоматически определить, какой уровень качества связи (бизнес- или стандартное) предоставляет оператор IP-телефонии;
- в пределах уровня определить группы с приоритетами операторов для каждого направления, при этом при близких значениях тарифов более высокий приоритет получает оператор IP-телефонии, предоставляющий большее значение параметра ASR.



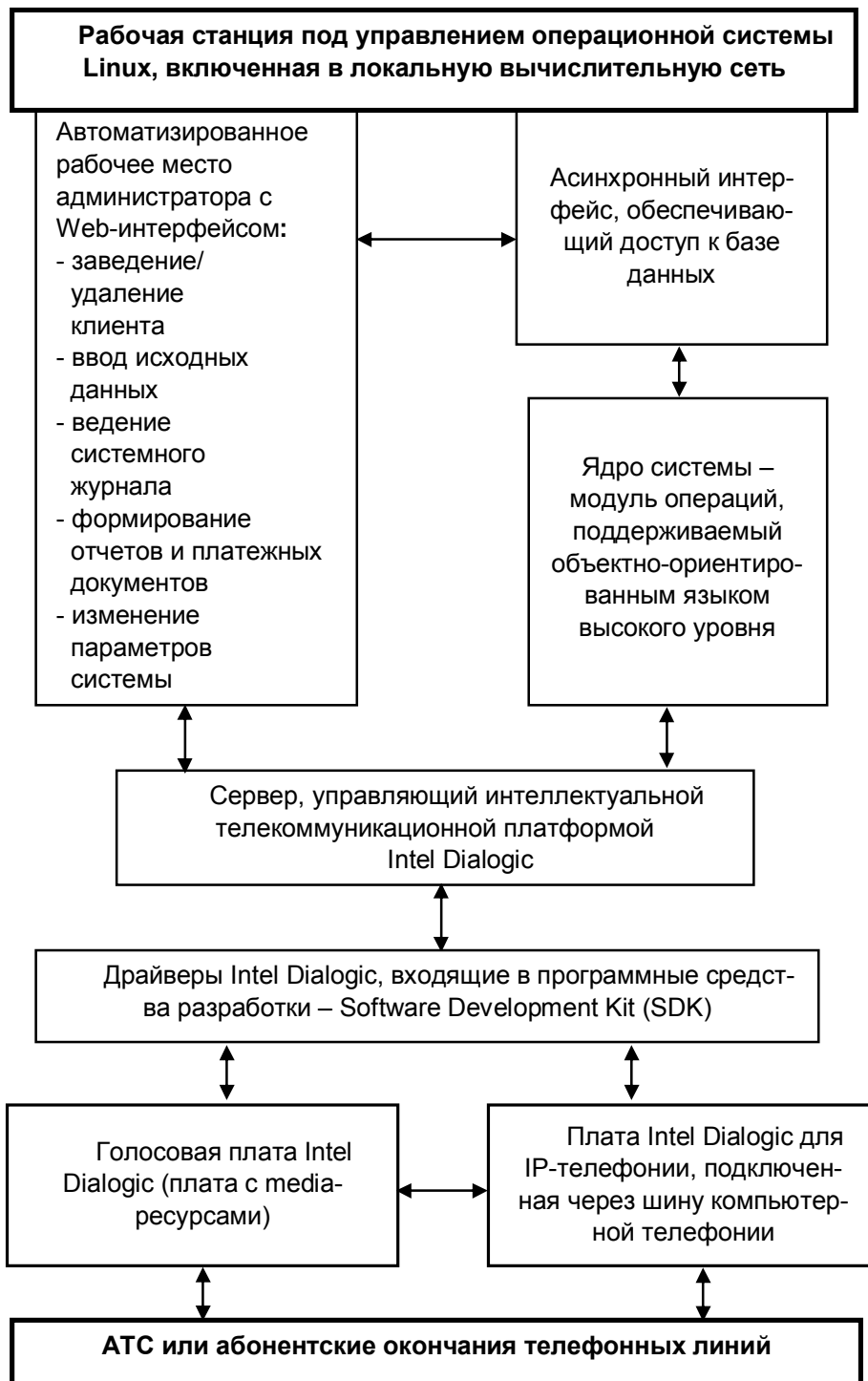


Рис. 1.

Таким образом, в соответствии с качеством связи и тарифами операторы IP-телефонии, распределены по двум уровням, а выбор оператора для маршрутизации вызова в пределах уровня обусловлен приоритетом оператора в группе, определенным для каждого междугородного или международного направления. Если по каким-либо причинам вызов не принимается оператором IP-телефонии, имеющим наивысший приоритет, для маршрутизации выбирается оператор, следующий за ним в группе.

В процессе работы Call-центра осуществляется автоматический контроль качества связи для каждого направления по вычисленному текущему значению параметра ASR. В случае его падения ниже усредненного значения, предоставленного оператором с наивысшим приоритетом, происходит понижение приоритета оператора по конкретному направлению в соответствии с вычисленным текущим значением ASR. Следующий за ним в группе по приоритетности оператор IP-телефонии получает наивысший

приоритет, что, в свою очередь, приводит к изменению маршрутизации вызовов. Тем самым обеспечивается поддержание качества связи с фиксированными затратами на осуществление вызова на каждом уровне.

С помощью административного интерфейса осуществляется ввод исходных данных, к которым, кроме регистрационных данных абонентов ЦОВ, относятся тарифные планы абонентов и операторов, таблицы междугородных и международных направлений с установленными приоритетами операторов для каждого уровня качества связи. Кроме того, административный интерфейс позволяет вручную изменять маршрутизацию вызовов, а также получить доступ к данным биллинговой системы для формирования отчетов и платежных документов. Причинами вмешательства администратора в процесс маршрутизации вызовов могут послужить непосредственные обращения абонентов в ЦОВ по поводу качества связи, а также предупреждения, формируемые автоматически, например, в случае снижения средней длительности разговора по какому-либо из направлений.

Передача операторам IP-телефонии упакованных платой Intel Dialogic типа DM/IP голосовых пакетов производится по IP-сети, т. е. плата играет роль шлюза [4]. При этом платы Intel Dialogic для IP-телефонии совместимы с оборудованием ведущих мировых производителей.

### Выводы

В описанном Call-центре с интегрированным приложением IP-телефонии на платформе Intel

Dialogic абоненту предоставлена возможность выбора уровня качества связи, при этом предложены различные тарифные планы, соответствующие бизнес- и стандартному качеству. Для каждого уровня качества определены группы операторов IP-телефонии, причем в каждой группе операторы расположены в порядке убывания приоритетов маршрутизации вызовов. В свою очередь приоритет, присвоенный оператору IP-телефонии, может изменяться в процессе работы в зависимости от вычисленного текущего значения параметра ASR для каждого направления. При этом поддержание качества связи происходит автоматически и не сопровождается значительным изменением затрат на осуществление вызова, так как в пределах группы тарифы операторов на данное направление имеют близкие значения.

### Литература

1. *Галицкий К.В.* Компьютерные системы в телефонии. – СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2002. – 400 с.
2. *Гольдштейн Б.С., Фрейнкман В.А.* Call-центры и компьютерная телефония. – СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2002. – 372 с.
3. Comptek, Россия. Компьютерная телефония. – <http://www.comptek.ru/telephony/>.
4. Основы передачи голосовых данных по сетям IP: Пер с англ. / Дж. Дэвидсон, Дж. Питерс, М. Бхатия и др. – 2-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. – 400 с.

## Информация

В.П. Корнєв, канд. техн. наук, О.М. Лисенко, д-р техн. наук, В.В. Собченко

### Всеукраїнська відкрита студентська олімпіада з «Програмування мікропрограмних автоматів та мікроконтролерних систем» в НТУУ «КПІ»

Вже другий рік поспіль кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури (КЕОА) факультету електроніки національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» проводить Всеукраїнську відкриту студентську олімпіаду з навчальної дисципліни «Програмування мікропрограмних автоматів та мікроконтролерних систем».

Офіційним організатором та ідейним і матеріальним спонсором цих заходів, які проводяться вже п'ятий рік, є компанія «OPEN SYSTEM» (Україна) на чолі з директором Олександром Володимировичем Ляпуном.

Олімпіада проводиться з метою виявлення, відбору та підтримки обдарованої студентської молоді, розвитку і реалізації здібностей студентів, стимулювання творчої праці студентів, педагогічних та науково-педагогічних працівників, підвищення якості підготовки фахівців, активізації навчально-пізнавальної діяльності студентів, системного вдосконалення навчального процесу. Кожен рік олімпіада проводиться у два етапи (тури). *Перший етап* – заочний, проходить восени, у жовтні-листопаді місяці, дистанційно, за допомогою мережі Internet. *Другий етап* – очний, проводиться безпосередньо в навчальному закладі, в якому саме – встановлюється наказом Міністерства освіти і науки України.

Перші «старті» олімпіади створені в Хмельницькому національному університеті, на кафедрі комп'ютерних систем та мереж.

З 2009 р., відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України № 1188 від 23 грудня 2008 р. «Про проведення Всеукраїнської студентської олімпіади 2009–2011 років», базовим вузом проведення олімпіади призначено Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».

У цьому році, 9–11 квітня відбулася вже дев'ята олімпіада. Гостей-учасників приймала кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури факультету електроніки на чолі з деканом факультету, професором, доктором технічних наук Жуйковим Валерієм Яковичем та завідувачем кафедри, професором, доктором технічних наук Лисенко Олександром Миколайовичем.

Відповідальними організаторами від кафедри вже вдруге були: інженер Собченко Владис-



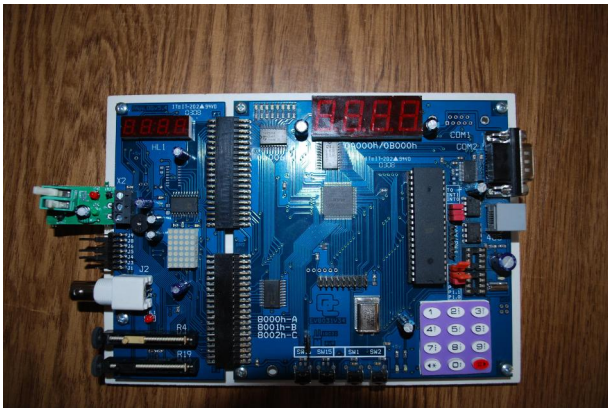
Декан ФЕЛ Жуйков В.Я. відкриває олімпіаду. На рис. ліворуч – праворуч: Пашов Р.І. (зам. проректора НТУУ «КПІ» з навчально-виховної роботи), Жуйков В.Я. (декан ФЕЛ), Ляпун О.В. (директор «OPEN SYSTEM»), Лисенко О.М. (зав. кафедри КЕОА), Собченко В.В. (інженер кафедри КЕОА), Корнєв В.П. (доцент кафедри КЕОА)

лав Вікторович, завдяки зусиллям якого рік тому олімпіада знайшла своє місце в НТУУ «КПІ»; доцент, канд. техн. наук Корнєв Володимир Павлович та доцент, канд. техн. наук Кучернюк Павло Валентинович, ентузіазм та професіоналізм якого стали гарантами безперебійної роботи технічного забезпечення змагань. За сприяння цих, а також наполегливій та самовідданій праці інших співробітників кафедри – у першу чергу, інженерів та учбових майстрів Орлової Світлани Іванівни, Смірної Тетяни Миколаївни, Данильчик Ганни Олександрівни та Шепілової Олени Олександрівни, студенток-старшокурсниць Собченко Лесі, Бутко Насті, асистента Лебедева Дениса Юрійовича та старшого викладача Бондаренко Наталії Олександрівни і безумовно при постійній особистій підтримці завідувача кафедри Лисенко Олександра Миколайовича не тільки студенти кафедри мають змогу три роки поспіль брати участь та представляти НТУУ «КПІ» на цій олімпіаді, а й сама ця подія вже вдруге успішно відбувається під дахом університету.

До участі в олімпіаді, як і у минулі роки, допускалися команди з двох учасників – переможців першого етапу (вузівських олімпіад). У цьому році

на змагання прибули 92 учасника та 28 їх енергійних і небайдужих керівників-наставників – всього 46 команд від 31-го навчального закладу. Таким чином представлено 23 міста України.

Національний технічний університет України НТУУ «КПІ» на олімпіаді, що відбулась цього року, представили п'ять команд, а саме: команда № 21 з факультету інформатики та обчислювальної техніки (кафедра автоматики і управління в технічних системах) – Ізотов Ілля, Савченко Павло (керівник – асистент Глушко Євгеній Васильович); та чотири команди з факультету електроніки: команда № 42 з кафедри промислової електроніки – Куденчук Сергій, Александров Дмитро (керівник – професор Петергеря Юлія Сергіївна), команди № 35 і № 43 з кафедри КЕОА у складі – Овчарик Іван, Гонтаренко Андрій та Торчинський Віталій і Запорожець Тарас (керівники – ст. викладач Бондаренко Наталія Олександрівна і доцент Корнєв В.П.), та «збірна команда» №43 кафедр КЕОА і мікроелектроніки у складі першокурсників Вірченко Владислава і Фокіна Дениса (керівники – доцент кафедри КЕОА Корнєв В. П. та доцент кафедри мікроелектроніки Татарчук Дмитро Дмитрович).



**Лабораторний стенд «EV8031/AVR»**

Змагання проводилися в приміщенні КБ інформаційних систем НТУУ «КПІ» (директор канд. техн. наук, доцент Савицький А.Й.), співробітниками якого під керівництвом доцента кафедри КЕОА Кучернюка П.В. було підготовлено п'ять класів із 50-ти робочими місцями. Кожне робоче місце — це персональний комп'ютер з підключеним до нього лабораторним стендом «EV8031/AVR», компанії «OPEN SYSTEM». В окремому класі було підготовлено шість таких самих робочих місць для журі.

Реєстрація учасників олімпіади, умови її проведення, склад спеціального програмного забезпечення були заздалегідь надані на сайтах компанії «OPEN SYSTEM» та НТУУ «КПІ». Під час проведення олімпіади взаємодія учасників та журі відбувалась у режимі «On-Line» за підтримки

мережевої оболонки, яку спеціально для цих змагань ще в минулому році було розроблено студентами кафедри КЕОА – Гапчич В.І. і Белоус Д.І.



**Студенти кафедри КЕОА Гапчич В.І. і Белоус Д.І. – розробники і адміністратори системи інформаційної підтримки олімпіади**

Конкурсні завдання на олімпіаду як завжди були складені колективом компанії «OPEN SYSTEM». За основу кожного завдання в деякій мірі було взято частину реальних проектів, вказуючи на те, що сьогодні студенти програмують конкурсні завдання, а завтра це може стати модулем складної системи керування.



**Команди працюють над завданнями олімпіади**



**Команда КЕОА: Торчинський В. (ДК-91) і (на попередньому плані) Запорожець Т. (ДК-81)**

Протягом шести годин команди виконували п'ять завдань по створенню функціонально завершених мікропроцесорних систем, кожне з



яких вимагало не тільки знань та навичок в програмуванні електронних пристроїв на базі однокристальних контролерів архітектури MCS51 або AVR, а і винахідливість, творчу наснагу та кмітливість.

Оригінальність і складність деяких завдань, потребували не тільки від учасників змагань, а і від членів журі вдумливого розбору та пошуку нестандартних рішень.



**Робочі моменти журі олімпіади**

Іноді навіть розгоралися бурхливі суперечки з приводу можливих варіантів рішення та оцінювання результатів.



**Керівники олімпіади оперативно вирішували проблемні питання**

В деяких випадках, коли звучало відчайдушне – «А В Т О Р А !!!», біля робочого місця того чи іншого «вундеркінда» збирався «консиліум»

для вирішення спірних питань та пошуку шляхів усунення проблем, пов'язаних із знайденими ним непередбаченими нюансами в роботі розробленої мікропроцесорної системи.

Особливу зацікавленість учасників змагань викликало завдання №1 – так званий «Монетоприймач» під девізом «Сам пан склепав», в якому учасники мали безпосередньо («власними руками») створити (намотати з мідного дроту) індуктивний датчик, підключити його до мікропроцесорного приладу, та під керуванням розробленої програми проводити розпізнавання монет різного номіналу.



**Студент Гонтаренко А. (ДК-72) за створенням датчика**

Студентські творіння з цього конкурсу журі перевіряло з особливим захопленням.



**Студенти ФЕЛ Фокін Д. (ДП-92) і Вірченко В. (ДК-91) демонструють журі свою роботу**

В результаті відібрано шість команд-номінантів, серед яких після змагань самі учасники, вибирали переможця в номінації «Сам пан склепав».

Кава-брейк з бутербродами, соком, чаєм чи кофе у перерві змагань як завжди був вчасним та приємним моментом олімпіади. Після ж напружених змагань для відновлення сил учасникам і їх наставникам було запропоновано повноцінний обід, під час якого недавні суперники вже дружньо спілкувалися між собою і ділилися враженнями.



Студенти ФЕЛ Овчарик І. і Гонтаренко А. (ДК-72) захищають свою роботу перед журі



Донецького національного технічного університету.



Нагородження команди ДДТУ – переможця у номінації «Сам пан склепав»

Переможця у номінації «Сам пан склепав» – команду Донбаського державного технічного університету, за створений ними «монетоприймач», який визнаний найкращим, чекав оригінальний приз – 12-кілограмовий мішок із 1000 гривениками!

Спонсором всіх цих нагород виступила компанія «OPEN SYSTEM».

Крім того були окремі номінації «За найбільш повне виконання завдання», «За найкоротшу програму», «За оригінальне рішення», «За максимально оперативне та правильне рішення завдання», «За найкраще рішення завдання керування рухомих об'єктом», та інші – всього (із загальними) 16 номінацій.



Учасники змагань під час перерви

Переможці змагань були нагороджені дипломами, цінними призами, сувенірами із символікою КПІ та грошовими преміями: **перше місце**, отримавши премію – 3000 грн і приз – стенд EV8031/AVR від компанії «OPEN SYSTEM», зайняла команда Черкаського національного університету ім. Б. Хмельницького, **друге місце** і дві премії по 2000 грн та стенди EV8031/AVR дісталися командам Донецького національного технічного університету та Вінницького технічного коледжу, **третє командне місце** (три премії по 1000 грн і призи – стенди EV8031/AVR) отримали команди Чернігівського державного технологічного університету, Київського національного авіаційного університету, та друга команда



Команда першокурсників ФЕЛ – Вірченко В. і Фокін Д. отримують нагороду

Приємно відзначити, що «збірна команда» першокурсників ФЕЛ (Вірченко В. та Фокін Д.) гідно протистояла командам більш старших та досвідчених суперників і перемогла у номінації «За мінімальний програмний код для мікроконтролера AVR».

У цьому році олімпіаду підтримали інфор-



маційні спонсори, які розмістили на своїх шпальтах інформацію про олімпіаду – журнал «CHIP NEWS Україна / Инженерная микроэлектроника», та журнал «Электронные компоненты и системы» фірми «VD MAIS». Від цієї компанії переможці олімпіади отримали спеціальний приз – вимірювальний пристрій «мультиметр».

Окрім цього всі команди-переможці та всі команди-номінанти отримали від інформаційних спонсорів у якості призу підписки на журнали «CHIP NEWS Україна» і «Электронные компоненты и системы» на 2010 рік.

Наступного дня, після офіційної частини, учасники здійснили чудову екскурсію до музею етнографії та зодчества у селищі Пирогово.



**З екскурсії до музею етнографії та зодчества у селищі Пирогово**

Наприкінці хочеться подякувати всім організаторам, які доклали чимало зусиль щоб знов зібрати найкращих представників майбутніх інженерів з провідних вищих навчальних закладів України. Адже олімпіада – це не лише змагання майбутньої технічної еліти, не лише перемога чи невдача, це – насамперед безцінний обмін досвідом між людьми – студентами-учасниками,

викладачами і представниками підприємств, які не просто очікують майбутніх працівників, а й активно впливають на їх підготовку і професійне становлення.



**Спілкування та обмін досвідом між викладачами – керівниками команд і представниками промисловості під час проведення студентської олімпіади**

Олімпіада – це виникнення спільних ідей і інтересів освітян і виробників, це також величезний внесок у майбутнє України. Хочеться вірити, що ці зустрічі матимуть велике значення не лише в професійному зростанні талановитих майбутніх інженерів-розробників, а також зароджують особисті взаємовідносини та майбутнє товариство між молоддю з усіх куточків України, що стане запорукою єднання нашої країни в цілому, яке так необхідне нам всім у наш час!

## Visit of Swedish lecturer to Faculty of Electronics

On March 29, 2006 the Memorandum of Understanding was signed by the Rector of NTUU «KPI», Academician Mikhail Zgurovsky and the Rector of Royal Institute of Technology (KTH), Professor Anders Flodström.

The Royal Institute of Technology (Kungliga Tekniska Högskolan, abbreviated KTH) is a university in Stockholm, Sweden. KTH was founded in 1827 as Sweden's first polytechnic university. Now KTH is one of the leading technical universities in Europe and highly respected worldwide, especially in the domains of technology and natural sciences.

Within the framework of existing collaboration between our universities in October, 2010 the Swedish Professor Carl-Axel Engdahl arrived to Ukraine and visited the Faculty of Electronics to give lectures about International Industrial Marketing for undergraduate and graduate students of various electronics specialities.

There were lectures on following topics:

- The international marketing in electronic industry;
- Organization of production and sales of electronic devices;
- The marketing planning, organization of sales with taking into account cultural differences.

Lectures were held in a warm benevolent atmosphere, with the use of modern technologies and often in form of a dialog between students and lecturer, so it's no wonder that professor Carl - Axel Engdahl and students of Faculty of Electronics remained completely content and satisfied with an effective cooperation.

In future we hope to deepen cooperation between the Royal Institute of Technology of Sweden and National technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", especially with the Faculty of Electronics, and to adjust the exchange of students and lecturers between two universities.



Professor Carl-Axel Engdahl (KTH, Sweden)





**During the lecture about International Industrial Marketing for future electronic engineers**

*Пичкалёв Е.С., Попов А.А., канд. техн. наук  
Национальный технический университет  
Украины «Киевский политехнический институт»*

## Прийняття до захисту докторської дисертації

На міжкафедральному семінарі факультету електроніки Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту» 12 травня 2010 р. заслухано доповідь доцента кафедри «Промислова електроніка» Ромашко В.Я. за матеріалами дисертаційної роботи «Аналіз режимів роботи перетворювачів електричної енергії методом функцій вільного режиму», поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії.

На засіданні, крім співробітників кафедри промислової електроніки, були присутні проф. Власюк Г.Г., проф. Пілінський В.В., доц. Швайченко В.Б. – кафедра звукотехніки та реєстрації інформації; проф. Дідковський В.С. – кафедра акустики та акустоелектроніки; проф. Тимофєєв В.І. – кафедра фізичної та біомедичної електроніки; проф. Жемеров Г.Г., проф. Ільїна Н.М. – кафедра промислової та біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний ін-

ститут»; проф. Денисюк С.П. – Інститут електродинаміки Національної академії наук України.

За результатами доповіді, дискусії та виступів фахівців було прийнято рішення рекомендувати докторську дисертацію доц. Ромашко В.Я. до захисту у спеціалізованій раді Д 26.002.19 НТУУ «КПІ» за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії.

Ромашко Володимир Якович трудовий шлях у Київському політехнічному інституті почав у 1973 році, працював інженером, асистентом, ст. викладачем, нині – доцент. Сфера наукових інтересів – дослідження електромагнітних процесів у дискретно-лінійних ланцюгах та застосування методу функцій вільного режиму до аналізу електромагнітних процесів в силових електронних пристроях. Ромашко В.Я. Має понад 50 наукових праць, 10 авторських свідоцтв, є автором навчального посібника, співавтором трьох підручників.

*Ямненко Ю.С., д-р техн. наук, зам. заведуючого кафедри ПЭ по научной работе  
Факультет електроніки Національного технічного ун-та України «Київський політехнічний інститут»*

# Оголошення

## Кафедра акустики та акустоелектроніки повідомляє:

1. Продовжується робота наукового семінару по прикладній акустиці та звукотехніці.  
Запрошуються всі бажаючі до участі в роботі семінару.
2. 11.11.2010 р. відбудеться захист:
  - докторської дисертації доц. кафедри А та АЕ Найди С.А. на тему «Теорія та проектування широкосмугових електроакустичних трактів для медичних приладів»;
  - кандидатської дисертації ст. викладача кафедри А та АЕ Кандрачука І.В. на тему «Фізичні поля прийомних криволінійних акустичних антен з екранами».
3. 01.12.2010 р. планується доповідь по кандидатській дисертації асистента кафедри А та АЕ Богданова О.В. на тему «Застосування фототермоакустичного перетворення для задач дефектоскопії»

# Електроніка та зв'язок

Науково-технічний журнал

№ 6, 2010

В авторській редакції  
Віддруковано з оригінал-макета замовника

Комп'ютерна верстка, дизайн

*О.Г. Кравченко*