

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

ISSN 1563-0064

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАТИКА

Научно-технический журнал

Основан в 1997 г.

№ 3(62), июль – сентябрь 2013

Выходит 4 раза в год

© Харьковский национальный
университет радиоэлектроники, 2013

Свидетельство о государственной регистрации КВ № 12097-968 ПР 14.12.2006

РИ, 2013, № 3

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОТЕХНИКА

ПОЗДНЯКОВ Е.К., ТКАЧЕНКО В.Н., КОРОТКОВ В.В. УВЕЛИЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ПАССИВНЫМИ ТРЕХПОЗИЦИОННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ В УСЛОВИЯХ ИЗБЫТОЧНОСТИ.....	3
ГАВРИШ О.С., ЗАБОЛОТНИЙ С.В., БУРДУКОВА О.В. МЕТОД АНАЛИЗУ АСИМПТОТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АДАПТИВНИХ АЛГОРИТМІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РАДІОСИГНАЛУ ПРИ ЕКСЦЕСНІЙ ЗАВАДІ З ВИКОРИСТАННЯМ НАВЧАЛЬНОЇ ВИБІРКИ.....	7
ЧЕРНЫШОВ Н.Н. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ АЭС.....	11

ЭЛЕКТРОНИКА

ГУСЕВ В.А., СТАРКОВ В.В., ШОФЕРИСТОВ С.Е., МУРЗИН Д.Г. МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ФОТОЭЛЕМЕНТА С ЗАРЯДОВЫМИ НАСОСАМИ.....	16
--	----

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

БАРАННИК В.В., ХАРЧЕНКО Н.А., БЕКИРОВ А.Э. МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ БАЗА УПРАВЛЕНИЯ БИТОВОЙ СКОРОСТЬЮ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПРЕДСКАЗАННЫХ КАДРОВ.....	23
--	----

СИСТЕМЫ И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ

КОЛОСОВА С.В., СИДОРОВ М.В. ПРИМЕНЕНИЕ ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ К РЕШЕНИЮ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ С ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ.....	28
ВОРОНИН А.А., ГАРЯЧЕВСКАЯ И.В. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБУЧЕНИЯ РАБОТЕ С СИСТЕМОЙ КОНТРОЛЯ ВЕРСИЙ «GPT».....	32

КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

ХАХАНОВ В.И., BAGHDADI AMMARAWNIABBAS, ЧУМАЧЕНКО С.В., ШКИЛЬ А.С., МЕЛИКЯН ВАЗГЕН. КУБИТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АНАЛИЗА И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ.....	36
---	----

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ

БАРАННИК В.В., РЯБУХА Ю.Н., КРАСНОРУЦКИЙ А.А. МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В НЕРАВНОМЕРНОМ БАЗИСЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ.....	46
ТУРЕНКО С.В. КОДИРОВАНИЕ ВЕКТОРА ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ КОРТЕЖЕЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПРЕССИИ С ТРАНСФОРМИРОВАНИЕМ КАДРОВ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ....	52
БОНДАРЕНКО М.А., МАКАРЕНКО А.Ю. СИСТЕМЫ ОБ'ЄКТНО-РЕЛЯЦІЙНОЇ ПРОЕКЦІЇ ДЛЯ C++.....	55

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

КОЗУЛЯ Т.В., БІЛОВА М.О. МЕТОД КОМПАРАТОРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ В СИСТЕМІ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	59
РЕФЕРАТИ	66
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЖУРНАЛА.....	69

УВЕЛИЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ПАССИВНЫМИ ТРЕХПОЗИЦИОННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ В УСЛОВИЯХ ИЗБЫТОЧНОСТИ

ПОЗДНЯКОВ Е.К., ТКАЧЕНКО В.Н.,
КОРОТКОВ В.В.

Рассматривается метод определения координат источника радиоизлучения (ИРИ) в трехпозиционных пассивных комплексах, основанный на использовании избыточной информации о местоположении цели. Обосновывается математический аппарат для метода определения координат ИРИ. Проводится имитационное моделирование определения координат с использованием разностно-дальномерного метода (РДМ) и рассматриваемого метода. Сравнение статистических характеристик результатов моделирования показывает увеличение точности результатов определения координат ИРИ при использовании исследуемого метода.

1. Введение

Основным методом современной пассивной локализации является разностно-дальномерный метод (РДМ), преимущества и недостатки которого описаны в [1,2].

Классический вариант предусматривает наличие четырех станций в составе комплекса. В этом случае РДМ позволяет однозначно определить три координаты цели в круговом секторе. Для комплекса, состоящего из трех станций, возможно определение только двух координат ИРИ (x,y) и возникает проблема с однозначностью их определения.

Предлагаемый метод основан на применении избыточной информации о местоположении цели. Общая информация об использовании теории избыточных измерений приведена в [4]. В предыдущих работах было выполнено исследование предложенного метода определения координат ИРИ для многопозиционного пассивного комплекса, состоящего из четырех принимающих станций [5]. Тем не менее, многие современные радиолокационные комплексы формируются из трех принимающих станций и используют РДМ для определения координат ИРИ. Поэтому исследование возможности применения рассматриваемого метода для трехпозиционного пассивного комплекса является актуальной задачей.

Целью данной работы является исследование метода определения координат ИРИ в трехпозиционных пас-

сивных комплексах, основанного на использовании результатов РДМ и решении задачи в условиях избыточности.

2. Сущность метода

На рис.1 схематически представлен пассивный трехпозиционный комплекс и ИРИ в пространстве.

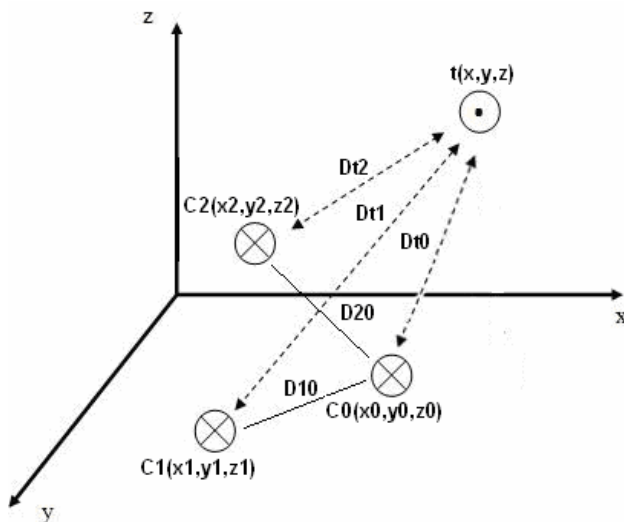


Рис. 1. Схематическое представление трехпозиционного комплекса и ИРИ

На рис.1 приняты следующие условные обозначения: C_0-C_2 – принимающие станции пассивного комплекса; $t(x,y,z)$ – ИРИ; D_{10}, D_{20} – расстояния от боковых станций до центральной станции C_0 ; D_{10} – расстояние от ИРИ до центральной станции; D_{11}, D_{12} – расстояния от боковых станций до ИРИ.

Для определения координат цели по РДМ необходимо составить и решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} f_1(x, y) = \frac{1}{c} \cdot \left(\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} + D_{10} - D_{10} \right) - \tau_1 \\ f_2(x, y) = \frac{1}{c} \cdot \left(\sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} + D_{20} - D_{10} \right) - \tau_2 \end{cases} \quad (1)$$

где c – скорость света; τ_1, τ_2 – временные задержки прихода сигнала от ИРИ на соответствующие станции комплекса C_1, C_2 .

Решение системы уравнений (1) может быть выполнено вычислительным методом или же с использованием аналитических выражений. Более подробно РДМ изложен в [1,2].

В данной статье в качестве избыточной информации предлагается использование дальностей D_{11}, D_{12} от боковых станций комплекса до ИРИ (см. рис.1). Значения D_{11}, D_{12} могут быть определены при известном периоде вращения антенно-фидерной радиолокационной системы (АФ РЛС) по методу, описанному в [6]. Другие альтернативные методы определения дальностей D_{11}, D_{12} описаны в [7]. Информация о

дальности до ИРИ является избыточной по отношению к РДМ, следовательно, система (1) может быть дополнена избыточными уравнениями и примет вид:

$$\left[\begin{aligned} f_1(x, y) &= \frac{1}{c} \cdot \left(\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} + D_{10} - D_{t0} \right) - \tau_1 \\ f_2(x, y) &= \frac{1}{c} \cdot \left(\sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} + D_{20} - D_{t0} \right) - \tau_2 \\ f_3(x, y) &= \frac{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} - D_{t1}}{c} \\ f_4(x, y) &= \frac{\sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} - D_{t2}}{c} \end{aligned} \right] \quad (2)$$

Система уравнений (2) содержит 2 неизвестные величины – координаты положения ИРИ (x, y), связанные четырьмя уравнениями, и является переопределенной. Нахождения корней системы (2) может быть выполнено путем решения экстремальной задачи. Для этого запишем квадратичный функционал G(x, y), равный сумме квадратов каждого уравнения системы (2):

$$G(x, y) = \sum_{i=1}^4 f_i(x, y)^2.$$

Минимум квадратичного функционала G(x, y) достигается в точке, определяемой уравнением:

$$\frac{\partial G(x, y)}{\partial \mathbf{p}} = 0, \quad (3)$$

где \mathbf{p} – вектор координат ИРИ.

Представим (3) в виде производных по компонентам вектора \mathbf{p} :

$$\left[\begin{aligned} \frac{\partial G(x, y)}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial G(x, y)}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right] \quad (4)$$

Система уравнений (4) содержит два уравнения и два неизвестных компонента вектора координат \mathbf{p} . Точка минимума квадратичного функционала G(x, y) является оценкой решения системы (2) и соответствует решению задачи определения координат ИРИ в условиях избыточности.

3. Имитационное моделирование определения координат ИРИ

Наиболее распространенным методом решения задач анализа статистической динамики является метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) [8]. Проведем имитационное моделирование определения координат ИРИ в соответствии с данным методом. Истинные значения координат станций комплекса и наблюдаемого ИРИ в декартовой двумерной проекции приведены в табл. 1.

Таблица 1
Координаты станций МПК и ИРИ

Объект	Координата x, км	Координата y, км	Дальность до ИРИ d, км
ИРИ	3298	2720	0
Центральная станция (C0)	3314	2621	101,4
Боковая станция (C1)	3297	2611	110
Боковая станция (C2)	3331	2611	115

В качестве начальных условий предположим, что погрешности определения временных задержек τ_1, τ_2 являются независимыми случайными величинами, которые распределены по нормальному закону [7], и станции комплекса имеют одинаковую погрешность определения входных параметров. Для генерации относительных погрешностей определения значений τ_1, τ_2 используется генератор случайных чисел, имеющий следующие статистические параметры:

$$\left[\begin{aligned} M_{\delta_{\tau}} &= 0\% \\ \sigma_{\delta_{\tau}} &= 0,2\% \end{aligned} \right],$$

где $M_{\delta_{\tau}}$, $\sigma_{\delta_{\tau}}$ – математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение (СКО) соответственно относительной погрешности δ_{τ} определения временной задержки τ . Значение СКО $\sigma_{\delta_{\tau}} = 0,2\%$ было выбрано исходя из оценки максимально допустимой относительной погрешности определения временной задержки в комплексе пассивной локации и с учетом правила трех сигм.

Величина временной задержки с учетом сгенерированной относительной погрешности определяется по формуле:

$$\tau \approx \tau_r + \Delta\tau,$$

где τ_r – значение временной задержки, соответствующее истинному положению цели; $\Delta\tau$ – величина абсолютной погрешности определения временной задержки, вычисленная на основе случайного значения относительной погрешности;

τ – значение временной задержки, определенное с учетом сгенерированной погрешности.

Число испытаний N принято равным 1000. На основании набора определенных временных задержек находятся координаты ИРИ с помощью РДМ.

Результатом имитационного моделирования РДМ является статистическая совокупность значений координат ИРИ, область которых приведена на рис. 2, где приняты следующие условные обозначения: \mathbf{p}_0 – пеленг от истинного положения ИРИ на центральную станцию C0; \mathbf{t} – истинное положение ИРИ.

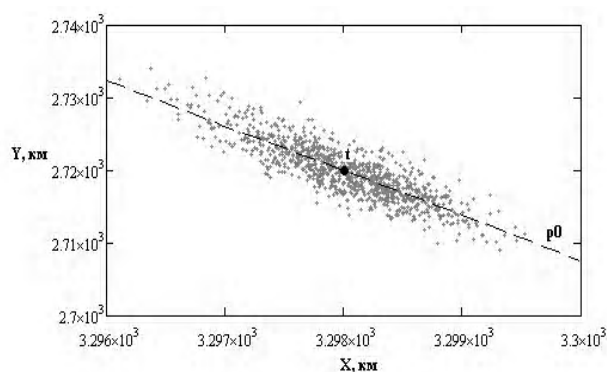


Рис.2. Поле ошибок координат ИРИ при использовании РДМ

Проведем аналогичным образом имитационное моделирование решения задачи в условиях избыточной информации.

В реальных условиях относительная погрешность определения дальностей D_{t1} , D_{t2} существенно выше погрешности определения временных задержек. Это связано с особенностями определения дальности в системах пассивной разведки. Исходя из технических характеристик пассивного комплекса, спецификаций известных ИРИ, а также результатов экспериментальных исследований методов определения дальности примем, что СКО относительной погрешности определения дальностей до ИРИ $\sigma_{\delta-d}$ равно 3,5%. В этом случае статистические характеристики генератора случайных чисел для относительных погрешностей определения дальности имеют вид:

$$\begin{bmatrix} M_{\delta-d} = 0\% \\ \sigma_{\delta-d} = 3,5\% \end{bmatrix}.$$

Используя временные задержки, рассчитанные при моделировании РДМ, а также определенные с учетом сгенерированных погрешностей значения дальностей D_{t1} , D_{t2} , выполним расчет координат ИРИ в условиях избыточности. Область определенных координат ИРИ при решении задачи в условиях избыточности приведена на рис. 3.

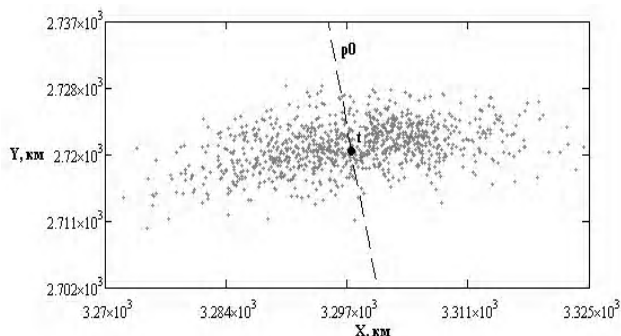


Рис. 3. Поле ошибок координат ИРИ при решении задачи в условиях избыточности

Для оценки погрешности результатов определения координат ИРИ используется второй начальный момент распределения вектора ошибок σ_{Σ} :

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2},$$

где σ_x , σ_y – соответственно СКО определения координаты x, y ИРИ.

Результаты вычисления статистических характеристик определения координат ИРИ при использовании РДМ и при решении задачи в условиях избыточности сведены в табл. 2.

В табл. 2 M_x , M_y – математическое ожидание определения координат X , Y ; M_d – математическое ожидание определения дальности D_{t0} ; σ_x , σ_y , σ_{Σ} , σ_d – соответствующие значения СКО.

Таблица 2
Статистические характеристики результатов моделирования

Метод	Математическое ожидание			ско			
	M_x , км	M_y , км	M_d , км	σ_x , км	σ_y , км	σ_{Σ} , км	σ_d , км
РДМ	3298	2720	100,177	0,538	3,91	3,947	3,934
Избыточность	3298	2721	101,36	9,083	2,975	9,558	2,679

Исходя из результатов табл. 2 можно сделать следующие выводы. Поле ошибок РДМ вытянуто вдоль линии пеленга. Другими словами, координаты ИРИ, определенные при использовании РДМ, имеют значение пеленга, близкое к истинному. Данный вывод подтверждается в [7].

При решении задачи определения координат ИРИ в условиях избыточности результаты расчета математического ожидания и СКО результатов определения компонентов вектора координат r значительно хуже в сравнении с РДМ. При решении задачи в условиях избыточности математическое ожидание M_d результатов определения дальности D_{t0} ближе к истинному значению дальности, чем в РДМ, и значение СКО σ_d меньше чем в РДМ. На основании этого выдвинуто предположение, что результаты решения задачи определения координат ИРИ в условиях избыточности распределены вдоль линии окружности, центр которой лежит в центральной станции комплекса, и радиусом R , равным значению дальности до ИРИ, полученному в результате решения задачи в условиях избыточности.

4. Уточнение координат ИРИ на основе использования РДМ и задачи в условиях избыточности

Выполним уточнение координат ИРИ, полученных в результате решения задачи в условиях избыточности. Для этого необходимо найти пересечение линии пеленга результата определения координат согласно РДМ с окружностью, центр которой лежит в центральной станции комплекса C_0 , и радиусом R , равным значению дальности, полученному в результате решения задачи в условиях избыточности.

Опишем уравнение линии пеленга в пространстве:

$$\frac{x - x_{t1}}{x_{c0} - x_{t1}} = \frac{y - y_{t1}}{y_{c0} - y_{t1}}, \quad (5)$$

где x_{c0}, y_{c0} – координаты центральной станции C_0 ; x_{t1}, y_{t1} – координаты ИРИ, определенные согласно РДМ.

Уравнение окружности с центром в точке C_0 и радиусом, равным D , имеет вид:

$$(x - x_{c0})^2 + (y - y_{c0})^2 = D^2, \quad (6)$$

здесь D – дальность от ИРИ до центральной станции C_0 , полученная в результате решения задачи определения координат в условиях избыточности.

Проведем уточнение результатов, полученных при решении задачи определения координат ИРИ в условиях избыточности путем нахождения точки пересечения (5) и (6) для каждой из точек, полученных в результате имитационного моделирования для РДМ и задачи в условиях избыточности.

Поле ошибок после уточнения показано на рис. 4.

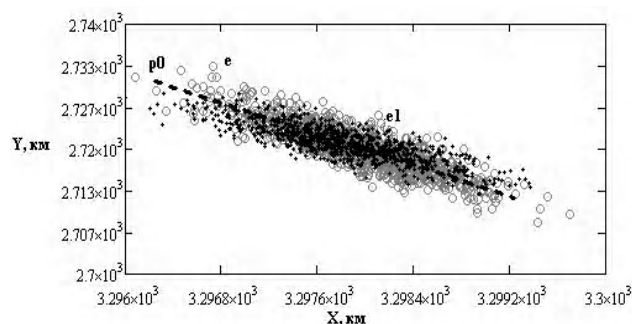


Рис. 4. Поле ошибок координат ИРИ при использовании рассматриваемого метода

На рис.4 приняты следующие условные обозначения: e – эллипс ошибок при использовании РДМ; $e1$ – эллипс ошибок при использовании рассматриваемого метода.

Расчет статистических характеристик результатов после уточнения координат приведен в табл. 3.

Как следует из табл. 3, математическое ожидание результатов РДМ и рассматриваемого метода близко к истинным значениям координат ИРИ (см. табл. 1). Однако поле ошибок рассматриваемого метода меньше, чем при использовании РДМ. Этот подтверждается тем, что СКО результатов определения координат x, y и дальности d в рассматриваемом методе примерно в 1,5 раза меньше СКО результатов РДМ.

5. Выводы

Рассмотрен математический аппарат использования избыточных данных для определения координат ИРИ в трехпозиционных пассивных комплексах. Проведенное имитационное моделирование показало, что

предложенный метод определения координат имеет меньшую область ошибок в сравнении с эллипсом ошибок РДМ. Данный вывод также подтверждается статистическими характеристиками результатов моделирования.

Темой дальнейших исследований может стать изучение влияния геометрического фактора в трехпозиционных пассивных системах, имеющих круговой сектор обзора, а также вопрос неоднозначности решения при определении координат ИРИ.

В целом метод определения координат ИРИ на основе РДМ и решения задачи в условиях избыточности является перспективным для практического использования в трехпозиционных пассивных комплексах пассивной локации в целях увеличения точности местоопределения ИРИ.

Литература: 1. Караваев В.В., Сазонов В.В. Статистическая теория пассивной локации. М.: Радио и связь, 1987. 240 с. 2. Казаринов Ю.М., Гришин Ю.П., Ипатов В.П. и др. Радиотехнические системы: учеб. для вузов по спец. М.: Высш. шк., 1990. 496 с. 3. Арсеньян Т.И. Распространение электромагнитных волн в тропосфере: учеб. пособие. Томск: ТУСУР, 2006. 170 с. 4. Кондратов В.Т. Избыточность: основные понятия и классификации // Вимір. та обчисл. Техніка в технол. процесах. 1997. № 1. С. 18 – 22. 5. Поздняков Е.К., Ткаченко В.Н., Коротков В.В. Исследование влияния геометрического фактора на точность определения координат многопозиционными пассивными комплексами в условиях избыточности // Вестник НТУУ “КПИ”. Серия Приборостроение. 2013. Вып. 46. С. 14 - 22. 6. Ткаченко В.Н., Коротков В.В., Поздняков Е.К. Повышение точности определения координат ИРИ пассивными системами при помощи измерения периода вращения АФС РЛС // Сборник статей «Радиотехника». 2012. №170. С.162-169. 7. Сайбель А.Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1958. 54с. 8. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2001. 343 с.

Поступила в редколлегию 02.09.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Скобцов Ю.А.

Поздняков Евгений Константинович, аспирант Института прикладной математики и механики НАНУ (ИПММ НАНУ), инженер-программист ПАО “СКБ РТУ”. Научные интересы: информационные технологии, системы пассивной разведки. Адрес: Украина, 83012, Донецк, ул. Соколиная, 1а, тел. (062)06-82-37, e-mail: us_work@bk.ru.

Ткаченко Валерий Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом теории управляющих систем ИПММ НАНУ. Научные интересы: параметрическая идентификация и управление технологическими процессами. Адрес: Украина, 83114, Донецк, ул. Розы Люксембург, 74, тел.: (062) 311-04-36, факс: (062) 311-02-85, e-mail: tkachenko@iamm.ac.donetsk.ua.

Коротков Вячеслав Валентинович, канд. техн. наук, главный инженер ПАО «СКБ

Таблица 3 РТУ». Научные интересы:

радиоэлектроника, системы пассивной разведки. Адрес: Украина, 83012, Донецк, ул. Соколиная, 1а, тел./факс (062)06-82-37, e-mail: korotkov@skbrtu.com.ua.

Статистические характеристики результатов после уточнения координат ИРИ

Метод	Математическое ожидание			СКО			
	$Mx, км$	$My, км$	$Md, км$	$\sigma x, км$	$\sigma y, км$	$\sigma \Sigma, км$	$\sigma d, км$
РДМ	3298	2720	100,177	0,538	3,91	3,947	3,934
Уточненный метод	3298	2721	101,36	0,533	2,644	2,698	2,679

МЕТОД АНАЛІЗУ АСИМПТОТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АДАПТИВНИХ АЛГОРИТМІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РАДІОСИГНАЛУ ПРИ ЕКСЦЕСНІЙ ЗАВАДІ З ВИКОРИСТАННЯМ НАВЧАЛЬНОЇ ВИБІРКИ

ГАВРИШ О.С., ЗАБОЛОТНИЙ С.В.,
БУРДУКОВА О.В.

Пропонується підхід, заснований на використанні методу максимізації полінома, для адаптивного вимірювання інформативного параметра радіосигналу при використанні основної та навчальної вибірок. Розробляється метод дослідження асимптотичних властивостей адаптивних алгоритмів, що дає можливість отримання аналітичних виразів дисперсій оцінок шуканих параметрів.

Вступ

Типовою задачею радіолокації та радіонавігації є оцінювання параметрів сигналів, що відбилися або випромінюються об'єктом [1]. Для спрощення розв'язку теоретичних задач припускається, що статистичні характеристики завади апріорно відомі [2]. Проте більш адекватною постановкою практичної задачі є адаптація алгоритму оцінювання під конкретну заводову обстановку, що реалізується шляхом спільного оцінювання параметрів корисного сигналу і завади. В роботах [3,4] запропоновано ефективний метод оцінювання параметрів випадкової послідовності, що базується на використанні кінцевої послідовності кумулянтів. Для різних моделей негауссівських завад, що описуються кінцевою послідовністю кумулянтів, отримано результати їх спільної оцінки з інформативними параметрами корисних сигналів, які характеризуються складністю алгоритмічної реалізації [4, 5]. В даній роботі для спрощення оцінювання параметра корисного сигналу при апріорній невизначеності відносно параметрів завади пропонується використовувати навчальну вибірку.

Метою роботи є подальший розвиток методу максимізації полінома у випадку використання навчальної вибірки для визначення параметрів завади заданого класу, а також розробка методу аналізу дисперсій оцінок шуканих параметрів.

Постановка задачі

Нехай на інтервалі часу спостереження $t \in [0; T]$ на вхід приймача потрапляє сигнал у вигляді адитивної суміші радіосигналу $S(t, \vartheta)$ і завади $\eta(t, \vec{p})$, який може бути представлений вибіркою об'ємом m незалежних неоднаково розподілених вибірових значень $\vec{y} = \{y_1, \dots, y_m\}$ з генеральної сукупності значень випадкової величини виду

$$y_v = S_v(\vartheta) + \eta_v(\vec{p}), \quad v = \overline{1, m}, \quad (1)$$

де радіосигнал може бути представлений у вигляді

$$S_v(\vartheta) = A e_v \cos(2\pi f \delta v + \varphi), \quad (2)$$

яко оцінюваний параметр ϑ може виступати будь-який з параметрів A, f, φ , які відповідно визначають амплітуду, частоту та початкову фазу сигналу; e_v – обвідна радіосигналу; δ – постійний період дискретизації; v – відліки часу спостереження. Значення параметрів сигналу, які не підлягають оцінці, є незмінними й апріорно відомими.

Будемо вважати, що завада $\eta_v(\vec{p})$ належить до класу ексцесних випадкових величин 1-го типу [3, 6]. Тоді параметр \vec{p} містить дві компоненти: дисперсію χ_2 і коефіцієнт ексцесу γ_4 , які є невідомими. Для з'ясування того, яких значень можуть набувати ці параметри в певний проміжок часу, необхідно мати в розпорядженні навчальну вибірку $\vec{x} = \{x_1, \dots, x_n\}$ з генеральної сукупності значень випадкової величини η_v , $v = \overline{1, n}$.

Введемо в розгляд таку математичну модель, що найповніше відображає властивості подібних генеральних сукупностей, яка може бути представлена у вигляді:

$$F_1(\vec{y}, \vartheta, \chi_2, \gamma_4) \Big|_{\substack{\chi_2 = \hat{\chi}_2 \\ \gamma_4 = \hat{\gamma}_4}}^{\vartheta = \hat{\vartheta}} = 0, \quad v = \overline{1, m}, \quad (3)$$

$$F_2(\vec{x}, \chi_2, \gamma_4) \Big|_{\substack{\chi_2 = \hat{\chi}_2 \\ \gamma_4 = \hat{\gamma}_4}} = 0, \quad v = \overline{1, n}.$$

Задача знаходження адаптивної оцінки інформативного параметра радіосигналу полягає у побудові функції $\hat{\vartheta} = \{\hat{\vartheta}, \hat{\chi}_2, \hat{\gamma}_4\}$ від наявних статистичних даних \vec{y} , яка була б найбільш точним наближенням значенням для істинної величини параметра $\vec{\vartheta}$. При цьому друга та третя компоненти векторного параметра $\vec{p} = \{\chi_2, \gamma_4\}$ знаходяться в результаті обробки навчальної вибірки \vec{x} .

Результати

Система рівнянь максимізації полінома для знаходження адаптивної оцінки інформативного параметра радіосигналу по основній вибірці \vec{y} об'ємом m та оцінок параметрів ексцесної завади 1-го типу по навчальній вибірці \vec{x} об'ємом n має вигляд

$$\sum_{i=1}^s \sum_{v=1}^m k_{i, \vartheta_1}^{(v)}(\vec{\vartheta}) [y_v^i - m_{iv}(\vec{\vartheta})] \Big|_{\vartheta = \hat{\vartheta}} = 0, \quad s = 2, 3, \dots$$

$$\sum_{i=1}^z k_{i, \vartheta_q}(\chi_2, \gamma_4) \sum_{v=1}^n [x_v^i - \alpha_i(\chi_2, \gamma_4)] \Big|_{\substack{\chi_2 = \hat{\chi}_2 \\ \gamma_4 = \hat{\gamma}_4}} = 0, \quad (4)$$

$z = 4, 5, \dots \quad q = 2, 3.$

Коефіцієнти першого рівняння $k_{1\vartheta_1}^{(v)}(\bar{\vartheta})$, $k_{2\vartheta_1}^{(v)}(\bar{\vartheta})$, ..., $k_{s\vartheta_1}^{(v)}(\bar{\vartheta})$, $i = \overline{1, s}$ залежать від моментів часу спостереження v , і знаходяться [5] з розв'язку системи алгебраїчних рівнянь виду

$$\sum_{j=1}^s k_{j\vartheta_1}^{(v)} F_{(i,j)}^{(v)} = \frac{\partial}{\partial \vartheta_1} m_{iv}, \quad s = 3, 4, \dots \quad i = \overline{1, s}, \quad (5)$$

де $m_{iv} = E y_v^i$ – початкові моменти випадкової величини y_v (де E – символ математичного сподівання), знаючи які легко знайти кореляційні моменти $F_{i,j}^{(v)}(\bar{\vartheta}) = m_{(i+j)v}(\bar{\vartheta}) - m_{iv}(\bar{\vartheta})m_{jv}(\bar{\vartheta})$.

Для знаходження вагових коефіцієнтів 2-го та 3-го рівнянь системи (4) будемо використовувати співвідношення, аналогічне виразу (5), враховуючи те, що коефіцієнти $k_{i\vartheta_q}(\bar{p})$, $i = \overline{1, z}$, $q = \{2, 3\}$ і початкові моменти $\alpha_i = E \eta_v^i$ випадкової величини η_v не залежать від моментів часу спостереження v .

В подальшому будемо вважати, що $\vartheta_1 = \vartheta$, $\vartheta_2 = \chi_2$, $\vartheta_3 = \gamma_4$.

Перепишемо систему рівнянь для сумісної оцінки параметрів $\vartheta, \chi_2, \gamma_4$ при використанні основної та навчальної вибірок у вигляді

$$\begin{aligned} f_{1\vartheta}(\bar{y}/\vartheta, \chi_2, \gamma_4) &= 0, \\ f_{2\chi_2}(\bar{x}/\chi_2, \gamma_4) &= 0, \\ f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\chi_2, \gamma_4) &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

При великих значеннях m і n розкладемо відповідні рівняння в ряд Тейлора в околі відповідних векторних параметрів, обмежившись першими двома членами. Отримаємо

$$\begin{aligned} f_{1\vartheta}(\bar{y}/\hat{\vartheta}, \hat{\chi}_2, \hat{\gamma}_4) &\approx f_{1A}(\bar{Y}/\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) + \\ &+ (\hat{\vartheta} - \vartheta_0) \frac{\partial}{\partial \vartheta} f_{1\vartheta}(\bar{Y}/\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) + \\ &+ (\hat{\chi}_2 - \chi_{20}) \frac{\partial}{\partial \chi_2} f_{1\vartheta}(\bar{Y}/\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) + \\ &+ (\hat{\gamma}_4 - \gamma_{40}) \frac{\partial}{\partial \gamma_4} f_{1\vartheta}(\bar{Y}/\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) \approx 0, \end{aligned} \quad (7)$$

друге рівняння

$$\begin{aligned} f_{2\chi_2}(\bar{x}/\hat{\chi}_2, \hat{\gamma}_4) &\approx f_{2\chi_2}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) + \\ &+ (\hat{\chi}_2 - \chi_{20}) \frac{\partial}{\partial \chi_2} f_{2\chi_2}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) + \\ &+ (\hat{\gamma}_4 - \gamma_{40}) \frac{\partial}{\partial \gamma_4} f_{2\chi_2}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) \approx 0, \end{aligned} \quad (8)$$

третє рівняння

$$\begin{aligned} f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\hat{\chi}_2, \hat{\gamma}_4) &\approx f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) + \\ &+ (\hat{\chi}_2 - \chi_{20}) \frac{\partial}{\partial \chi_2} f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) + \\ &+ (\hat{\gamma}_4 - \gamma_{40}) \frac{\partial}{\partial \gamma_4} f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) \approx 0. \end{aligned} \quad (9)$$

У виразах (7)-(9) і далі по тексту додатковий індекс «0» в позначеннях параметрів вказує на їх істинні значення. Показано [3], що у відповідності з виразом

$$-\frac{\partial^2}{\partial \vartheta_q \partial \vartheta_g} I_{sm}^{(q)}(\bar{Y}/\bar{\vartheta})_{\bar{\vartheta}_0} \rightarrow J_{sm}^{(q,g)}(\bar{\vartheta}_0). \quad (10)$$

можна для рівняння (7) ввести такі позначення похідних:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \vartheta} f_{1\vartheta}(\bar{y}/\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) &= -J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}), \\ \frac{\partial}{\partial \chi_2} f_{1\vartheta}(\bar{y}/\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) &= -J_{sm}^{(1,2)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}), \\ \frac{\partial}{\partial \gamma_4} f_{1\vartheta}(\bar{y}/\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) &= -J_{sm}^{(1,3)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}). \end{aligned}$$

Аналогічно для рівнянь (8) і (9) можна записати

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \chi_2} f_{2\chi_2}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) &= -J_{zn}^{(2,2)}(\chi_{20}, \gamma_{40}), \\ \frac{\partial}{\partial \gamma_4} f_{2\chi_2}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) &= -J_{zn}^{(2,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}), \\ \frac{\partial}{\partial \chi_2} f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) &= -J_{zn}^{(2,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}), \\ \frac{\partial}{\partial \gamma_4} f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) &= -J_{zn}^{(3,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}). \end{aligned}$$

Тоді система рівнянь (7)-(9), з врахуванням позначень, може бути записана у вигляді

$$\begin{aligned} (\hat{\vartheta} - \vartheta_0) J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) &+ (\hat{\chi}_2 - \chi_{20}) J_{sm}^{(1,2)} \times \\ &\times (\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) + (\hat{\gamma}_4 - \gamma_{40}) J_{sm}^{(1,3)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) = \\ &= f_{1\vartheta}(\bar{y}/\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (\hat{\chi}_2 - \chi_{20}) J_{zn}^{(2,2)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) &+ (\hat{\gamma}_4 - \gamma_{40}) \times \\ &\times J_{zn}^{(2,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) = f_{2\chi_2}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} (\hat{\chi}_2 - \chi_{20}) J_{zn}^{(2,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) &+ (\hat{\gamma}_4 - \gamma_{40}) \times \\ &\times J_{zn}^{(3,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) = f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}). \end{aligned} \quad (13)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (11)-(13), легко знайти величини відхилень оцінок параметрів від своїх істинних значень. У відповідності з правилом Крамера маємо

$$(\hat{\vartheta} - \hat{A}_0) = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad (\hat{\chi}_2 - \chi_{20}) = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad (\hat{\gamma}_4 - \gamma_{40}) = \frac{\Delta_3}{\Delta},$$

де Δ – головний визначник системи рівнянь (11)-(13), який дорівнює

$$\Delta = \begin{vmatrix} J_{sm}^{(1,1)}(\bar{\vartheta}) & J_{sm}^{(1,2)}(\bar{\vartheta}) & J_{sm}^{(1,3)}(\bar{\vartheta}) \\ 0 & J_{zn}^{(2,2)}(\bar{p}) & J_{zn}^{(2,3)}(\bar{p}) \\ 0 & J_{zn}^{(2,3)}(\bar{p}) & J_{zn}^{(3,3)}(\bar{p}) \end{vmatrix} = \quad (14)$$

$$= [J_{zn}^{(2,2)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) J_{zn}^{(3,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) - (J_{zn}^{(2,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}))^2] \times J_{sm}^{(1,1)}(A_0, \chi_{20}, \gamma_{40}),$$

тут Δ_r , $r = 1, 2, 3$ – визначники, одержувані з головного визначника Δ шляхом заміни r -го стовпця стовпцем вільних членів.

Тоді легко одержати вираз для величини $(\hat{\vartheta} - \vartheta_0)$

$$(\hat{\vartheta} - \vartheta_0) = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} f_{1\vartheta}(\bar{y}/\bar{\vartheta}) & J_{sm}^{(1,2)}(\bar{\vartheta}) & J_{sm}^{(1,3)}(\bar{\vartheta}) \\ f_{2\chi_2}(\bar{x}/\bar{p}) & J_{zn}^{(2,2)}(\bar{p}) & J_{zn}^{(2,3)}(\bar{p}) \\ f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\bar{p}) & J_{zn}^{(2,3)}(\bar{p}) & J_{zn}^{(3,3)}(\bar{p}) \end{vmatrix} =$$

$$= \frac{1}{\Delta} [f_{1\vartheta}(\bar{y}/\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) M_{1,1} - f_{2\chi_2}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) M_{2,1} + f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) M_{3,1}],$$

де $M_{i,1}$, $i = \overline{1,3}$ – мінори елементів $a_{i,1}$.

Величина відхилення оцінки дисперсії χ_2 від свого істинного значення має вид

$$(\hat{\chi}_2 - \chi_{20}) = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} J_{sm}^{(1,1)}(\bar{\vartheta}) & f_{1\vartheta}(\bar{y}/\bar{\vartheta}) & J_{sm}^{(1,3)}(\bar{\vartheta}) \\ 0 & f_{2\chi_2}(\bar{x}/\bar{p}) & J_{zn}^{(2,3)}(\bar{p}) \\ 0 & f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\bar{p}) & J_{zn}^{(3,3)}(\bar{p}) \end{vmatrix} =$$

$$= \frac{1}{\Delta} [f_{2\chi_2}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) J_{zn}^{(3,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) - f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) J_{zn}^{(2,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40})],$$

Відхилення оцінки коефіцієнта ексцесу γ_4 від свого істинного значення дорівнює

$$(\hat{\gamma}_4 - \gamma_{40}) = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} J_{sm}^{(1,1)}(\bar{\vartheta}) & J_{sm}^{(1,2)}(\bar{\vartheta}) & f_{1\vartheta}(\bar{y}/\bar{\vartheta}) \\ 0 & J_{zn}^{(2,2)}(\bar{p}) & f_{2\chi_2}(\bar{x}/\bar{p}) \\ 0 & J_{zn}^{(2,3)}(\bar{p}) & f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\bar{p}) \end{vmatrix} =$$

$$= \frac{1}{\Delta} [f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) J_{zn}^{(2,2)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) - f_{2\chi_2}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) J_{zn}^{(2,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40})].$$

Дисперсія оцінки $\hat{\vartheta}$ може бути знайдена в такий спосіб: $\sigma_{\hat{\vartheta}}^2 = E(\hat{\vartheta} - \vartheta_0)^2$.

РИ, 2013, № 3

Маємо

$$\sigma_{\hat{\vartheta}}^2 = E(\hat{\vartheta} - \vartheta_0)^2 = \frac{1}{\Delta^2} [M_{1,1}^2 E\{f_{1\vartheta}^2(\bar{y}/\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40})\} + M_{2,1}^2 E\{f_{2\chi_2}^2(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40})\} + M_{3,1}^2 E\{f_{3\gamma_4}^2(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40})\} - 2M_{1,1}M_{2,1} E\{f_{1\vartheta}(\bar{y}/\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) f_{2\chi_2}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40})\} + 2M_{1,1}M_{3,1} E\{f_{1\vartheta}(\bar{y}/\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40})\} - 2M_{2,1}M_{3,1} E\{f_{2\chi_2}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40})\}].$$

Розкривши операцію математичного сподівання, одержимо

$$E\{f_{1\vartheta}^2(\bar{y}/\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40})\} = J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}),$$

$$E\{f_{2\chi_2}^2(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40})\} = J_{zn}^{(2,2)}(\chi_{20}, \gamma_{40}),$$

$$E\{f_{3\gamma_4}^2(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40})\} = J_{zn}^{(3,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}),$$

$$E\{f_{1\vartheta}(\bar{y}/\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) f_{2\chi_2}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40})\} =$$

$$= E\{f_{1\vartheta}(\bar{y}/\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40})\} = 0,$$

$$E\{f_{2\chi_2}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40})\} = J_{zn}^{(2,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}).$$

Таким чином, кінцевий вираз для обчислення дисперсії оцінки параметра ϑ має вигляд

$$\sigma_{\hat{\vartheta}}^2 = \frac{1}{\Delta^2} [M_{1,1}^2 J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) + M_{2,1}^2 J_{zn}^{(2,2)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) + M_{3,1}^2 J_{zn}^{(3,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) - 2M_{2,1}M_{3,1} J_{zn}^{(2,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40})]. \quad (15)$$

Розглянемо важливий з практичної точки зору випадок, коли кореляція між амплітудою гармонічного сигналу і параметрами ексцесної завади 1-го типу відсутня, тобто

$$J_{sm}^{(1,2)}(A_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) = J_{sm}^{(1,3)}(A_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) = 0. \quad (16)$$

Легко показати, що при виконанні умови (16) вираз (15) прийме вид

$$\sigma_{\hat{A}}^2 = \frac{1}{J_{sm}^{(1,1)}(A_0, \chi_{20}, \gamma_{40})}, \quad (17)$$

тобто дисперсія оцінки амплітуди радіосигналу, знайдена спільно з параметрами ексцесної завади 1-го типу із застосуванням навчальної вибірки, буде повністю збігатися з оцінкою скалярного параметра A при відомих параметрах ексцесної завади 1-го типу.

Приведемо ланцюжок перетворень для виводу формули дисперсії оцінки $\hat{\chi}_2$:

$$\sigma_{\hat{\chi}_2}^2 = E(\hat{\chi}_2 - \chi_{20})^2 = \frac{1}{\Delta^2} [(J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}))^2 \times J_{zn}^{(3,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) + (J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) J_{zn}^{(2,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}))^2 \times E\{f_{3\gamma_4}^2(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40})\} - 2(J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}))^2 \times J_{zn}^{(2,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) J_{zn}^{(3,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) \times E\{f_{2\chi_2}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40}) f_{3\gamma_4}(\bar{x}/\chi_{20}, \gamma_{40})\}].$$

Використовуючи наведені вище вирази для математичних сподівань відповідних функцій, одержимо кінцевий вираз для визначення дисперсії оцінки параметра χ_2 :

$$\begin{aligned} \sigma_{\chi_2}^2 = E(\hat{\chi}_2 - \chi_{20})^2 = & \frac{1}{\Delta^2} [(J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) \times \\ & \times J_{sn}^{(3,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}))^2 J_{sn}^{(2,2)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) - \\ & - (J_{sm}^{(1,1)}(A_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) J_{sn}^{(2,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}))^2 J_{sn}^{(3,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40})]. \end{aligned} \quad (18)$$

Дисперсія оцінки коефіцієнта асиметрії дорівнює

$$\begin{aligned} \sigma_{\gamma_4}^2 = E(\hat{\gamma}_4 - \gamma_{40})^2 = & \frac{1}{\Delta^2} [(J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) \times \\ & \times J_{zn}^{(2,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}))^2 E\{f_{3\gamma_4}^2(\bar{x} / \chi_{20}, \gamma_{40})\} + \\ & + (J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) J_{zn}^{(2,2)}(\chi_{20}, \gamma_{40}))^2 \times \\ & \times E\{f_{2\chi_2}^2(\bar{x} / \chi_{20}, \gamma_{40})\} - 2(J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}))^2 \times \\ & \times J_{zn}^{(2,2)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) J_{zn}^{(2,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) \times \\ & \times E\{f_{2\chi_2}(\bar{x} / \chi_{20}, \gamma_{40}) f_{3\gamma_4}(\bar{x} / \chi_{20}, \gamma_{40})\}]. \end{aligned}$$

Після розкриття операції математичного сподівання й приведення подібних одержимо

$$\begin{aligned} \sigma_{\gamma_4}^2 = & \frac{1}{\Delta^2} [(J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) J_{zn}^{(2,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}))^2 \times \\ & \times J_{zn}^{(3,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}) + (J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}))^2 (J_{zn}^{(2,2)}(\chi_{20}, \gamma_{40}))^3 - \\ & - 2(J_{sm}^{(1,1)}(\vartheta_0, \chi_{20}, \gamma_{40}) J_{zn}^{(2,3)}(\chi_{20}, \gamma_{40}))^2 J_{zn}^{(2,2)}(\chi_{20}, \gamma_{40})]. \end{aligned} \quad (19)$$

З виразів (15), (18) і (19) видно, що для відшукування точнісних характеристик оцінок необхідно знати елементи відповідних матриць кількості добутої інформації, які обчислюються за виразом (5).

Висновки

Наукова новизна даної роботи полягає в подальшому розвитку методу максимізації полінома за рахунок одночасного використання основної та навчальної вибірок, що дає змогу налаштовуватись під конкретну заводську обстановку в рамках визначеної моделі експресної завади 1-го типу.

Очевидно, що за умови використання навчальної вибірки вдається зменшити ступінь нелінійності одного з каналів алгоритму вимірювання параметрів при збереженні точнісних характеристик порівняно з випадком самонавчання за основною вибіркою. Достойністю пропонуваного обчислювального методу є те, що з ростом ступеня полінома асимптотичні властивості оцінок параметрів можуть підвищуватися на основі врахування негауссівського характеру завади у вигляді кумулянтного коефіцієнта 4-го порядку.

Запропоновано метод оцінювання точнісних характеристик адаптивних алгоритмів вимірювання інформативного параметра радіосигналу, який дає можливість отримати аналітичні вирази для дисперсій оцінок параметрів корисного сигналу та завади за умови використання навчальної вибірки.

Література: 1. *Сосулин Ю.Г.* Теоретические основы радиолокации и радионавигации. М.: Радио и связь, 1992. 304 с. 2. *Гавриш А.С.* Построение высокоточных измерителей параметров гармонического сигнала при воздействии негауссовских помех. // Радиотехника и информатика. 2000. №1. С. 8-13. 3. *Кунченко Ю.П.* Полиномиальные оценки параметров близких к гауссовским случайных величин. Часть 1. Стохастические полиномы, их свойства и применение для нахождения оценок параметров. Черкассы: ЧИТИ, 2001. 133 с. 4. *Кунченко Ю.П., Гавриш А.С.* Метод максимизации полинома и его приложения в радиотехнике // Радиотехника и информатика. 2000. №2. С. 7-13. 5. *Гавриш А.С.* Разработка совместного измерителя параметров гармонического сигнала, дисперсии и коэффициента эксцесса помехи // Радиотехника. 2002. №125. С. 57-61. 6. *Фомин А.Ф., Стафеев А.В.* Приближенная идентификация законов распределения помех в адаптивных приемниках // Радиотехника. М., 1992. №1, 2. С. 36-41.

Поступила в редколлегию 04.09.2013

Рецензент: д-р техн. наук Лега Ю.Г.

Гавриш Олександр Степанович, канд.фіз.-мат.наук, доцент кафедри радіотехніки Черкаського державного технологічного університету. Наукові інтереси: статистична обробка сигналів. Адреса: Україна, 18006, Черкаси, бул. Шевченка, 406, тел. (0472)730261, E-mail: notgeld@ukr.net.

Заболотній Сергій Васильович, канд.техн.наук, докторант кафедри радіотехніки Черкаського державного технологічного університету. Наукові інтереси: статистична обробка сигналів. Адреса: Україна, 18006, Черкаси, бул. Шевченка, 406, тел. (0472)730261 E-mail: zabolotni@ukr.net.

Бурдукова Олена Володимирівна, інженер 1-ї категорії кафедри радіотехніки Черкаського державного технологічного університету. Наукові інтереси: статистична обробка сигналів. Адреса: Україна, 18006, Черкаси, бул. Шевченка, 406, тел. (0472)730261, E-mail: hackee1@rambler.ru.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ АЭС

ЧЕРНЫШОВ Н.Н.

Статья посвящается памяти академика НАН Украины Владимира Михайловича Ажажи

Рассматривается состояние атомной энергетики в Украине и дается классификация существующих в мире реакторов. Делается обзор конструкции реакторов с водой и тяжелой водой под давлением, реактора с кипящей водой и реактора на быстрых нейтронах. Показываются их физические характеристики. Рассматриваются реакторы нового поколения. Дается характеристика компьютерных программ для нейтронно-физического расчета реакторов атомных электростанций. Рассматриваются вопросы организации программ и расчетные модели активных зон реакторов.

1. Введение

Согласно оценкам Международного энергетического сообщества потребление энергии в мире повышается со скоростью 3% в год. Компенсация нехватки энергии ведет к загрязнению окружающей среды. На смену должны прийти альтернативные (энергия солнца, ветра и др.), но ввиду их нерентабельности использование в полной мере этих источников на данный момент невозможно. Большие надежды возлагаются на атомную энергетику. В настоящее время производство 16% всего электричества в мире приходится на атомную энергетику. При условии правильного конструирования и эксплуатации АЭС более привлекательны. Сейчас в 30 странах мира функционируют более 440 и сооружается 25 ядерных энергоблоков. Мощность энергетических источников может вырасти к 2020 году в 2 раза. В настоящее время вклад атомной энергетики в топливно-энергетический баланс достаточно велик. Отсутствие альтернативных источников энергии делает ее перспективной, несмотря на имевшие место аварии на Чернобыльской АЭС и Three-Mile-Island в США. Спектр реакторов в мировой энергетике весьма широк: от использующих необогащенное топливо типа CANDU до реакторов на быстрых нейтронах (БН) с натриевым теплоносителем. Для безопасной работы АЭС применяются эксплуатационные и расчетные компьютерные программы (КП). Они могут работать в режимах “off-line” и “on-line”. Требование быстроты получения результата связано с выполнением расчетов в ограниченный период времени, например - перезагрузки топлива. Эксплуатационные КП включают в себя нейтронно-физический и теплогидравлический расчеты.

Цель работы: сделать классификацию реакторов для использования их на АЭС и показать возможность нейтронно-физического моделирования.

Задачи, решаемые в работе: описать КП для перезагрузки топлива; показать алгоритмы подготовки констант с учетом выделения энергии; сделать оценку интегральных и локальных характеристик реактора; исследовать неасимптотические процессы для разработки алгоритма расчета нейтронных полей.

2. АЭС в Украине

По производству электроэнергии на АЭС Украина входит в восьмерку, по вкладу получаемой электроэнергии в общий объем электроэнергии - в пятерку стран мира (рис. 1). Атомная энергетика в Украине является важной составляющей общего топливно-энергетического комплекса и занимает ведущие позиции в энергообеспечении страны [1]. В настоящее время в Украине на 4-х АЭС действует 13 ВВЭР-1000 и 2 ВВЭР-400 ядерных энергоблоков с общей мощностью 13835 МВт (табл. 1). Необходимо рассмотреть возможности продления сроков службы АЭС. В решении этих задач участвуют институты НАН Украины и НАЭК “Энергоатом” [2].

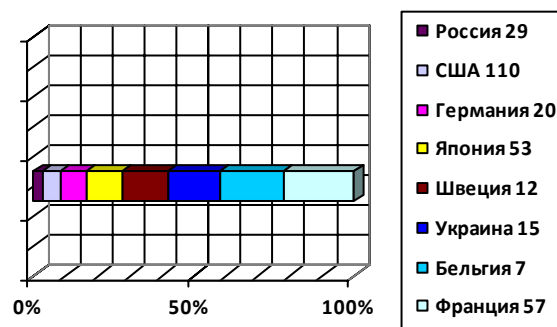


Рис.1. Выработка электроэнергии на АЭС в мире от общего производства

3. Классификация реакторов

Развитие атомной энергетики началось в 50-60-х годах прошлого столетия. Разрабатывались установки с различными теплоносителями (тяжелая или легкая вода, органические жидкости, жидкие металлы, газы или расплавленные соли) и разными видами топлива (^{235}U , $^{238}\text{U}/^{239}\text{Pu}$, $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$, оксиды, карбиды, металлические сплавы). На основе этих проектов были построены демонстрационные АЭС (Поколение I). Началом эры атомной энергетики можно считать декабрь 1942 года, когда в США под руководством Э. Ферми был пущен первый реактор. В СССР первый реактор был пущен под руководством И.В. Курчатова в декабре 1946 года в Москве. В июне 1954 года была пущена первая АЭС (5 МВт) в Обнинске.

Поколение II. Входят реакторы различных типов [3]. В зависимости от энергии спектра нейтронов они разделяются на быстрые, промежуточные и тепловые; по конструктивным особенностям – корпусные и каналные; по типу теплоносителя – водяные, тяжеловодные и натриевые; по типу замедлителя – водяные, графитовые и тяжеловодные (табл. 2).

Таблица 1
Срок эксплуатации энергоблоков

Наименование АЭС	№ блока	Мощность, МВт	Пуск	Ресурс
Запорожская	1	1000	10.12.84	2014
	2		22.07.85	2015
	3		10.12.86	2016
	4		18.12.87	2017
	5		14.08.89	2019
	6		19.10.95	2025
Южно-Украинская	1	1000	31.12.82	2012
	2		06.01.85	2015
	3		20.09.89	2019
Ровенская	1	420	22.12.80	2010
	2	415	22.12.81	2011
	3	1000	21.12.86	2016
	4		16.10.04	2034
Хмельницкая	1	1000	22.12.87	2017
	2		08.08.04	2034

Таблица 2
Разновидности реакторов

Тип реактора	Количество	ГВт	Топливо
PWR (США, Франция, Япония, Россия)	263	237	UO ₂
BWR (США, Япония, Швеция)	92	81	UO ₂
С газовым охлаждением (Magnox & AGR), Англия	26	11	Природный U UO ₂
С тяжелой водой под давлением CANDU (PHWR), Канада	38	19	Необогатненное UO ₂
Легководный графитовый (РБМК), Россия	17	13	UO ₂
На БН (FBR) (Япония, Франция Россия)	3	1	PuO ₂ и UO ₂
Всего	439	361	

На данный момент электроэнергия на АЭС вырабатывается реакторами двух типов, разработки 1950-х годов. Это реакторы с водой под давлением (PWR) и кипящей водой (BWR). Канальные реакторы CANDU и РБМК позволяют производить перезагрузку без остановки. Если в качестве замедлителя используется графит или тяжелая вода, реактор можно эксплуатировать на природном уране, который имеет тот же изотопный состав, что и в урановой руде (0,8 % ²³⁵U, 99,2 % ²³⁸U). В обогащенном уране доля делящегося изотопа (²³⁵U) увеличена до 3,5-5% [4]. Все ядерное топливо является керамическим оксидом урана UO₂ с температурой плавления 2800°C. Топливные таблетки (D – 1 см; H – 1,5 см), помещенные в трубку, образуют ТВЭЛ. Циркалой является сплавом на основе Zr, который не поглощает нейтроны. ТВЭЛы группируются в тепловыделяющие сборки (ТВС). Их длина составляет около – 3,5 м.

4. Реакторы с водой под давлением (PWR)

В мире используется более чем 230 таких реакторов. Вода в них служит одновременно как теплоноситель и как замедлитель. Особенностью конструкции является наличие двух контуров теплообмена. В первичном контуре вода под большим давлением прокачивается через активную зону, а во вторичном контуре образуется пар, вращающий турбину. В активной зоне реактора PWR вертикально устанавливаются ТВС (каждая содержит 200-300 ТВЭЛов). В большом реакторе помещается приблизительно 150-250 ТВС с 80-100 тоннами урана. Температура воды в активной зоне реактора достигает приблизительно 325°C. Чтобы избежать ее кипения, приходится создавать давление около 150 атмосфер. Давление поддерживается паром в компенсаторе (рис. 2). В первичном контуре вода служит замедлителем, и если вследствие перегрева часть ее перейдет в пар, цепная реакция деления прекратится. Эффект отрицательной обратной связи является одним из элементов безопасности. Другая система безопасности, останавливающая при необходимости цепную реакцию деления, использует введение бора в теплоноситель первого контура. Во втором контуре давление меньше, вода в теплообменниках закипает. Теплообменник является парогенератором. Пар заставляет вращаться турбину и электрогенератор, а затем конденсируется и возвращается в теплообменник [5].

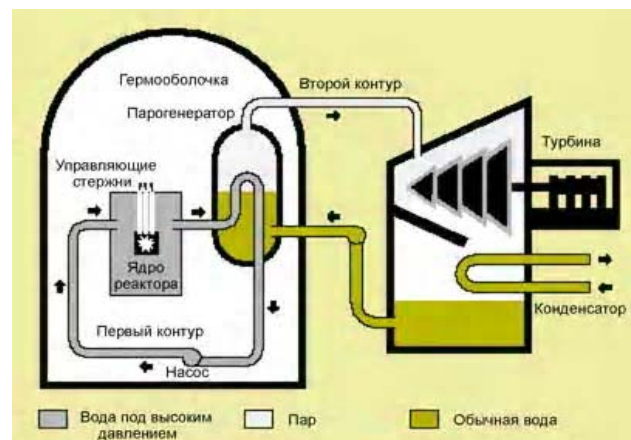


Рис. 2. Схема PWR

5. Реакторы с кипящей водой (BWR)

В реакторе BWR имеется только один контур теплоносителя, в котором вода циркулирует под давлением около 75 атмосфер (рис. 3), а при температуре 285°C вода закипает. 12-15% воды в верхней части активной зоны превращается в пар, что приводит к ухудшению замедления нейтронов. Пар проходит через паровой сепаратор над активной зоной, а затем поступает к турбинам. Так как вода первого контура всегда загрязнена радионуклидами, турбина должна быть защищена. Стоимость всего этого уравнивается выгоды более простой конструкции BWR по сравнению с PWR. Радиоактивность связана с короткоживущими изотопами. Основным изотопом является ¹⁶N (время

полураспада – 7с). Так что в турбинный зал можно входить вскоре после остановки реактора. ТВС BWR содержит 90-100 ТВЭЛов. В реакторе размещается до 750 сборок с 140 тоннами урана. Дополнительная регулирующая система может ограничивать расход воды через активную зону, что сопровождается повышенным парообразованием, ухудшением процесса замедления нейтронов и снижением мощности.

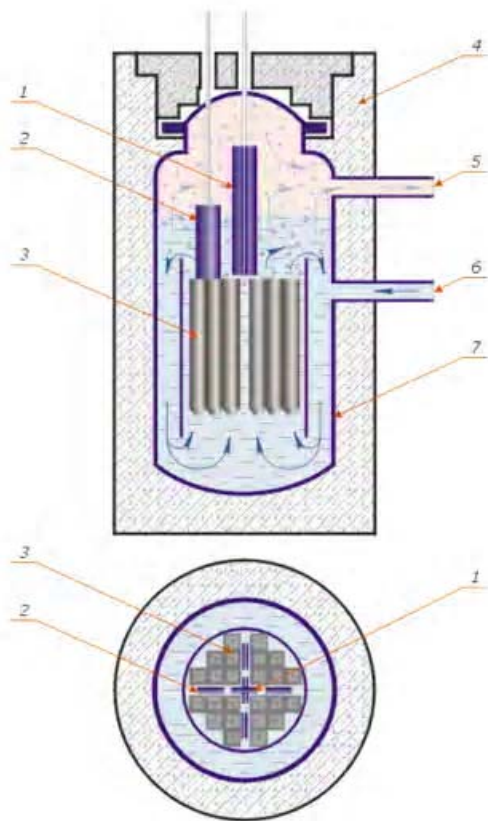


Рис. 3. Схема BWR: 1 – стержень аварийной защиты; 2 – управляющий стержень; 3 – ядерное топливо; 4 – биологическая защита; 5 – выход пароводяной смеси; 6 – выход воды; 7 – корпус

6. Реакторы с тяжелой водой под давлением (PHWR или CADU)

Схема построения и принцип работы очень схож с реактором типа PWR, но в отличие от него в CANDU (рис. 4) топливом служит оксид природного урана. Следовательно, реакции требуется слабопоглощающий нейтроны замедлитель – тяжелая вода (D_2O).

7. Реакторы БН - 600

В мире только один реактор БН-600 в России (рис. 5). США свернули программу по исследованию БН. В нем нет замедлителя и энергия вырабатывается за счет деления урана и плутония быстрыми нейтронами. В качестве топлива используется двуокись урана UO_2 с большим обогащением по ^{235}U (17, 21, 26%) или смесь UO_2 и PuO_2 . В процессе его работы из изотопа ^{238}U (природного урана), специально помещаемого на периферии активной зоны, может нарабатывается делящийся изотоп плутония ^{239}Pu . Поэтому такой реак-

тор называется размножителем. В них из одного и того же количества урана можно получить в 60 раз больше энергии, чем в реакторах на тепловых нейтронах, но они являются дорогостоящими [7, 8].

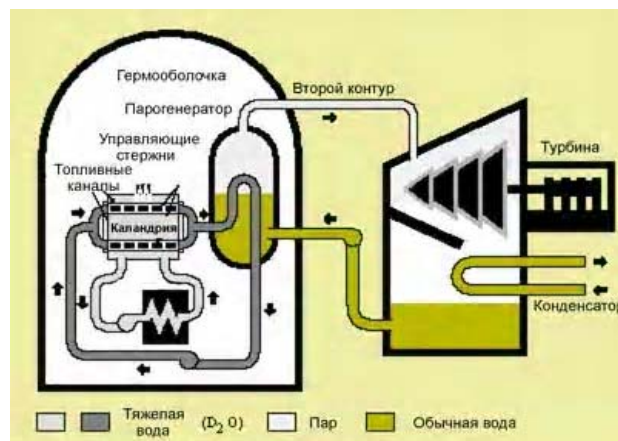


Рис. 4. Схема CANDU

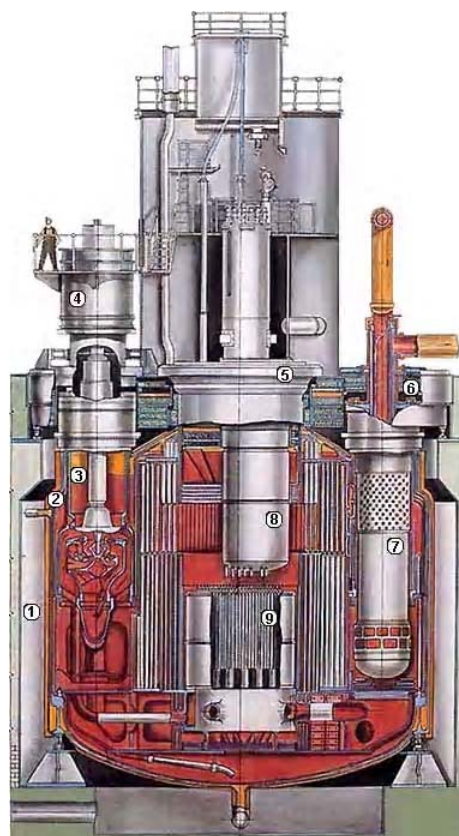


Рис. 5. Схема реактора БН- 600: 1 – шахта; 2 – корпус; 3 – главный циркуляционный насос; 4 – электродвигатель; 5 – поворотная пробка; 6 – радиационная защита; 7 – теплообменник; 8 – поворотная колонна; 9 – активная зона

8. Поколение III и III+

В настоящее время конструкторы АЭС в Северной Америке, Японии, Европе, России и Южной Африке имеют с десятком новых проектов реакторов третьего поколения, находящихся на последних стадиях разработки. Реакторы третьего поколения обладают стандартизированным проектом для каждого типа, позво-

ляющим ускорить лицензирование и уменьшить капитальные затраты. Они отличаются более простым проектом, более высоким коэффициентом использования мощности и большим сроком службы – обычно 60 лет. У них минимальное воздействие на окружающую среду, более высокое выгорание при уменьшении потребляемого топлива. В настоящее время проходят разработки реактора на кипящей воде ABWR.

9. Нейтронно-физические расчеты

В расчетах реакторов используются КП для нейтронно-физического расчета. Необходимо иметь информацию о ТВС или стержне системы управления и защиты (СУЗ). К такой информации относятся: характеристика сборки; организация топливного архива (ТА); КП, обеспечивающие доступ пользователя к входной, архивной и выходной информации [9]. В КП предусмотрен обмен расчетными данными через оперативную память ЭВМ [10, 11]. Центральным файлом является ТА, который содержит информацию об элементах рассчитываемой зоны [12]. Содержание ТА: идентифицированные, паспортные, конструкционные и временные характеристики, данные о топливе. ТА заполняется из буферного файла базы данных и должен соответствовать базовой модели холодного состояния. Из известных КП можно отметить следующие: COSMOS [15], MODERN [16], URAN [17], SYNTES [11], JAR [18], TRIGEX [19], ГЕФЕЦЕТ [12]. КП COSMOS создана в рамках работы над реактором PFR. Модуль SNAP [20] нейтронно-физического расчета КП COSMOS и ERAMOS. Обеспечивает расчеты в диффузионном приближении. В Англии используется модуль MARC с применением теории возмущений [19-21]. КП JAR [18] предназначена для расчета реактора типа БН в диффузионном приближении. КП MODERN создана для эксплуатационных расчетов. Ее структура включает следующие модули: формирования нуклидного состава [21, 22]; подготовки каталогов микроконстант, основанный на диффузионном приближении КП ARAMAKO и SYNTES [22]; решении диффузионного уравнения методом итерационного синтеза. Целью создания расчетных моделей является желание обеспечить возможность отслеживания истории целостной технологической единицы. Однако в работающих КП была обнаружена ограниченность такого подхода, так как большие размеры ТВС ведут к разным скоростям реакций при значительном градиенте плотности тока нейтронов. Реализация отслеживания характеристик ТВС применяется на практике. В КП ГЕФЕСТ [11, 13] хранятся характеристики граней ТВС и концентрации трех определяющих нуклидов в шести секторах. Следующий шаг в этом направлении – переход на расчетные модели. Обоснование безопасной работы реактора требует оценки нестационарных процессов, которые начинаются в ТВЭЛе. КП ГЕФЕСТ предназначена для нейтронно-физических расчетов реакторов типа БН. Она создана для расчета в многогрупповом диффузионном приближении и позволяет рассчитывать поля нейтронов в 20000 точках [13]. Большое

количество зон определило необходимость разработки метода подготовки констант. В основе этого метода лежит использование библиотеки заблокированных микроконстант как функции топливного состава, глубины выгорания и температуры. Эта библиотека рассчитывается КП ARAMAKO. Для расчета движения стержней СУЗ используется алгоритм, позволяющий менять сечения для расчетных точек. Это дает возможность определять выгорание поглотителя в зависимости от положения стержней. Спектры нейтронов определяются с помощью 26-группового расчета. Основным модулем КП является HEXD [23], где реализовано решение диффузионного уравнения. ГЕФЕСТ позволяет выделять область реактора для использования сетки. ТА служит для хранения информации о сборках и стержнях СУЗ. Его структура обеспечивает расчет флюенсов для ТВС. Для расчета эффектов реактивности разработаны алгоритмы теории возмущений. Имеется возможность решения уравнения кинетики в квазистатическом приближении. В КП определяются параметры амплитудной функции (время жизни мгновенных и доли запаздывающих нейтронов). ГЕФЕСТ включает в себя набор независимых модулей: CATAL – подготовка каталогов; BUREM – коррекция высотного распределения нуклидов и флюенсов в выгоревших ТВС; RORDV – расчет концентраций нуклидов в СУЗ; SNEGAAR – расчет макро- и микросечений для ТВС; HEXG – нейтронно-физический расчет в диффузионном приближении; ТЕРGAZ – теплогидравлический расчет; INTER – определение максимальных значений потоков нейтронов по отдельным сборкам; BURN – расчет изменения нуклидного состава и флюенсов нейтронов; QUASIK – квазистатический расчет. В КП, предназначенных для расчетов реактора типа БН, используется оригинальный метод подготовки констант. Наиболее простой является подготовка констант в КП URAN, где используется каталог групповых макроконстант (до 60 зон) с применением параметрических зависимостей. В КП TRIGEX для каждой зоны рассчитываются константы с введением поправок и оценкой спектра нейтронов [23]. Сделанные оценки нейтронных спектров используются для групповых констант, с которыми проводится расчет. Цель этого этапа – получение распределения источников нейтронов. Далее проводится 26-групповой расчет инерций источников интегральных спектров. Уточненные спектры используются для вычисления малогрупповых констант. При такой процедуре подготовки констант с большими градиентами не могут быть учтены локальные неоднородности. В КП MODERN решается уравнение переноса в диффузионном приближении с использованием системы распределенных каталогов, которая получается из диффузионного расчета. Далее определяются средние концентрации и вычисляются заблокированные микросечения. Расчет концентрации нейтронов выполняется КП SYNTES.

10. Выводы

Анализ современной атомной энергетики показал, что в ближайшее время могут возникнуть некие проблемы с энергоснабжением. Энергоблоки украинских АЭС уже практически исчерпали свой ресурс. Попытка продлить их срок службы пока не до конца реализована. Ввиду того, что параллельно ведутся проекторочные работы над возведением новых энергоблоков, есть возможность избежать перебоев в энергоснабжении. В то время как Украина решает свои проблемы, связанные с атомной энергией, во многих странах ведутся разработки реакторов нового поколения, более экономичных, надежных и безопасных. Научная новизна – в работе дана классификация реакторов и показаны новые КП для нейтронно-физического моделирования. Расчетные погрешности этих КП содержат три основных составляющих: алгоритмическую, константную и модельную.

Практическое значение состоит в том, что сделаны теоретические оценки погрешности синтетического или сеточного метода расчета. На расчетных моделях типа benchmark можно оценить погрешность приближения (диффузионного или кинетического). Константная составляющая погрешности известна исследователю до расчетов и определяется системой. Перед разработчиком КП стоит задача по уменьшению погрешности – это снижение ее модельной составляющей. Алгоритмическая составляющая погрешности может быть оценена теоретически.

Литература: 1. Фридман Н.А., Новиков В.П. Будущее развитие ядерных реакторов и топливных циклов - ядерная технология безопасности // Новости энергетики. 2001, №3. С. 18-21. 2. Неклюдов И.М. Современное состояние и перспективы развития энергетики в Украине // Энергетическая политика Украины. 2006. С. 385-390. 3. Аршавский И.М., Крошилин А.Е., Селезнев Е.Ф. Обзор методов построения математического обеспечения тренажера АЭС / Вопросы атомной науки и техники / Физика ядерных реакторов. М.: Атомиздат. 1991. №5. С. 10-17. 4. Зизин М.Н. Расчет нейтронно-физических характеристик реакторов. М., 1978. 98 с. 5. Зизин М.Н., Шушаков А.В., Дементьева Д.Ю., Сушинова Н.Б. Интеллектуальная программная оболочка ShIPR для математического моделирования ядерных реакторов / Препринт ИАЭ-5705/5. М., 1994. 36 с. 6. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций / ПРЯ-РУ АС-89. 1990. 60 с. 7. Джадд А. Реакторы размножители на быстрых нейтронах. М.: Энергоатомиздат, 1984. 136 с. 8. Абагян А.А., Крошилин А.Е., Майданик В.Н., Селезнев Е.Ф., Фукс Р.Л. Динамические математические модели АЭС. М.: Атомная энергия. 2000. Т. 88-6. С. 415-426. 9. Герасимов И.В., Давиденко В.Д., Лобынцев В.А., Цибульский В.Ф., Чибинаев А.В. Генерация проблемно-ориентированных программных комплексов в ПС КРИСТАЛЛ // Нейтроника - 93 / Алгоритмы и программы для нейтронно-физических

расчетов ядерных реакторов. Обнинск, 1996. С. 156-157. 10. Grin L. World nuclear status report 1999 // Nuclear Europe Worldscan. 2000. № 7-8. P. 25-49. 11. Рахматулин М.А., Селезнев Е.Ф. Аннотация программы SYNTES // Вопросы атомной науки и техники / Физика ядерных реакторов. М.: РНЦ КИ. 1994. №4. С. 43-49. 12. Альперович М.Н., Григорьева Н.М., Сысоева О.В., Селезнев Е.Ф., Яблоков С.Л. Аннотация комплекса ГЕФЕСТ // Вопросы атомной науки и техники / Физика ядерных реакторов. М.: РНЦ КИ. 1994. №4. С. 36-43. 13. Селезнев Е.Ф., Рябышкин О.В., Яблоков С.Л. ГЕФЕСТ как центр информационной среды / Проблемы безопасности ядерных реакторов. МИФИ, 1995. Т.1. С. 200-201. 14. Nevinita A.I., Kornienko Yu. N., Shylenko B.I. Development of a reactor installation data base for providing transients and accidents analysis in nuclear power installations // Proceeding of an International Topical Meeting "Sodium cooled fast reactor safety". Obninsk, Russia, October 3-7. 1994. Vol. 2. P. 14-23. 15. Wardleword D., Wheeler R.C. Reactors Physics Computational Methods in Support of the Prototype fast Reactor // J. Brit. Nuc. Energy Soc. 1974. Vol. 13, № 4. P. 383. 16. Ярославцева Л.Н., Шишков Л.К. Алгоритм решения двухмерного и трехмерного многогруппового уравнения диффузии // Отчет ВНИИАЭС № ОЭ-0453/78. М., 1978. 310 с. 17. Сергин А.С. Аннотация TRIGEX для малогруппового нейтронно-физического расчета реактора в трехмерной гексагональной геометрии // Вопросы атомной науки и техники / Физика ядерных реакторов. М., 1983. № 4-33. С. 59-60. 18. Burstall R.F. UK Codes for core physics. Proceeding of the seminar on core physics in the frame of the Europe-USSR collaboration. November 25-29, 1991. P. 63-75. 19. Николаев М.И., Рязанов Б.Г., Савоськин М.М. Многогрупповое приближение в теории переноса нейтронов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 400 с. 20. Селезнев Е.Ф. Аннотация комплекса программ SYNTES // Вопросы атомной науки и техники / Физика ядерных реакторов. М.: РНЦ КИ. 1984. № 6-43. С. 56-58. 21. Абагян Л.П., Базазянц Н.О., Николаев М.Н. Групповые константы для расчета реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1981. 200 с. 22. Селезнев Е.Ф., Григорьева Н.М. Подстановка констант для статических и динамических расчетов реактора БН-600 // Нейтронно-физические проблемы безопасности ядерно-энергетических установок. М.: ЦНИИ атоминформ, 1989. С. 45-46. 23. Carta M., Gra-nget G., Palmiotti G., Salvatores M., Solve R. Conrol rod heterogeneity effects in liquid-metal fast breeder reactors / Method developments and experimental validation // Nuclear Science and Engineering, 1989. P. 269-278.

Поступила в редколлегию 20.11.2013

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Панченко А.Ю.

Чернышов Николай Николаевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: математическая физика; методы математического анализа; численное моделирование; задачи теории поля, солнечной и ядерной энергетики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 7021362. E-mail: chernyshov@kture.kharkov.ua.



МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ФОТОЭЛЕМЕНТА С ЗАРЯДОВЫМИ НАСОСАМИ

ГУСЕВ В.А., СТАРКОВ В.В.,
ШОФЕРИСТОВ С.Е., МУРЗИН Д.Г.

Проводится анализ конструктивно-технологических вариантов изготовления кремниевых солнечных элементов наземного назначения. Показывается, что реализация коротковременной технологии термофотонной и лазерной обработки пластин «солнечного» кремния приводит к качественному изменению механизма пролёта базы фотопреобразователя, обусловленного образованием пространственных дефектнопримесных комплексов, играющих роль зарядовых насосов. Приводятся результаты экспериментальных исследований по повышению тока короткого замыкания солнечных элементов квазиимпульсной термофотонной обработкой.

Введение

Для разработки недорогих методов производства солнечных элементов (СЭ) с удовлетворительным КПД ($\geq 20\%$) на основе «солнечного» кремния и мультикремния, содержащих высокие концентрации структурных дефектов, требуются уточнения механизмов транспорта фотогенерированных носителей заряда в материале с гетерогенно распределенными пространственными дефектами типа преципитатно-дислокационных комплексов или колоний (ПДК). Пространственная неоднородность рекомбинационно-генерационных свойств поглощающего излучение объема базы фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) затрудняет применение традиционной оценки фотоэлектрических характеристик СЭ с помощью усредненного значения времени жизни τ_{ef} и диффузионной длины L_{ef} . Кроме того, большой размер пластин СЭ (до 200 см²) приводит дополнительно к макроскопической флуктуации характеристик СЭ в различных участках фронтальной поверхности [1].

Тем не менее, опыт производства и эксплуатации коммерческих СЭ наземного применения показал, что ФЭП, изготовленные из менее совершенных пластин «солнечного» кремния, иногда превышают по эффективности преобразования СЭ из более совершенных монокристаллических пластин. Возможной причиной подобной ситуации является переход на низкотемпературную с малым бюджетом времени технологию изготовления СЭ (RTP-Rapid Thermal Processing) и изменением механизма переноса носителей заряда в базе ФЭП, обеспечивающим уменьшение рекомбинационных потерь в пластинах с боль-

шим содержанием структурных дефектов. Одним из вероятных механизмов снижения рекомбинационных потерь может быть уменьшение времени разделения фотогенерированных носителей тока аналогично процессам в структуре СЭ с зарядовыми насосами [2]. Зарядовые насосы различной природы могут быть реализованы дефектно-примесной инженерией, обеспечивающей зарождение, кластеризацию, агрегацию и преципитацию пространственных структурных дефектов с последующим или сопровождающим геттерированием быстро диффундирующих примесей (БДП) и осаждением легирующих и нейтрализующих примесей из пересыщенных твердых примесных растворов с помощью быстрых фотонных тепловых воздействий и термической закалки.

Целью данной работы является анализ конструкторско-технологических вариантов получения структур кремниевых СЭ и реализации различных видов зарядовых насосов методами дефектно-примесной инженерии.

1. Теоретическая часть

Основные необратимые потери энергии в ФЭП вызываются следующими явлениями: отражением части солнечного излучения от поверхности СЭ; рассеиванием на фонах избыточной энергии фотонов; прохождением части излучения без поглощения; поглощением части излучения на просветляющих, антиотражающих и защитных слоях покрытий; рекомбинацией генерированных носителей тока в объеме и на поверхности ФЭП; внутренним сопротивлением объема и контактной системы ФЭП; падением фотоЭДС с ростом температуры.

Первые четыре вида потерь относятся к оптическим потерям η_{opt} , остальные – к рекомбинационным потерям ($\eta_{рек}$). Общая эффективность η или КПД может быть представлена в виде:

$$\eta = \frac{P_{эл}}{P_{пад}} = \frac{P_{эл}}{P_{погл}} \cdot \frac{P_{погл}}{P_{пад}} = \eta_{рек} \eta_{opt}, \quad (1)$$

где $P_{эл} = I_m \cdot U_m$ – согласованная с нагрузкой электрическая мощность; $P_{пад}$ – мощность падающего солнечного излучения; $P_{погл}$ – мощность поглощенного ФЭП солнечного излучения; $\eta_{рек}$ – доля КПД, определяемая рекомбинационными потерями; η_{opt} – доля КПД, определяемая оптическими (фотонными) потерями.

Подобное представление общей эффективности (1) упрощает качественный и количественный анализ влияния технологических режимов и условий эксплуатации ФЭП на его фотоэлектрические параметры. В этом случае независимое определение η из отношения электрической мощности к падающей световой при установившейся конструкции ФЭП ($\eta_{opt} = \text{const}$) позволяет оценить изменения уровня рекомбинацион-

ных потерь и конструкторско-технологические направления по их снижению.

Оптическая компонента эффективности может быть представлена в виде:

$$\eta_{\text{опт}} = \eta_{\text{max}} (1 - R)(1 - T)K(\lambda)d, \quad (2)$$

где $\eta_{\text{max}} \approx 0,3$ для кремния [3] для условий AM1,5; R , T – коэффициенты отражения и пропускания просветляющих, антиотражающих и защитных покрытий; $K(\lambda, d)$ – коэффициент захвата света конструкцией СЭ; λ – длина волны; d – толщина поглощающего слоя (базы) ФЭП.

Доля эффективности ФЭП, обусловленная рекомбинационными потерями в объеме и на фронтальной и тыльной поверхностях СЭ, определяется отношением электрической мощности, отдаваемой в согласованную нагрузку ($R_H = R_0 = U_m/I_m$) к поглощенной световой мощности, обеспечивающей конверсию излучательной энергии в электрическую (внутренний фотоэффект, $h\nu \geq \Delta E_g$ или $\lambda_{\text{гр}} \leq hc / \Delta E_g = 1,23 / \Delta E_g$

мкм, где ΔE_g – ширина запрещенной зоны полупроводника):

$$\eta_{\text{рек}} = \frac{U_m I_m}{P_{\text{полг}}},$$

здесь $P_{\text{полг}}$ обеспечивает как $P_{\text{эл}}$, так и рекомбинационные потери, моделируемые в диодной схеме замещения последовательным сопротивлением R_s , шунтирующим R_{sh} , и темновым током:

$$P_{\text{полг}} = U_m I_m + I_m^2 R_s + \frac{U_m^2}{R_{sh}} + \int_0^{U_m} I(U) dU.$$

Из этого выражения следует

$$\eta_{\text{рек}} = \left[1 + \frac{R_s}{R_0} + \frac{R_0}{R_{sh}} + \frac{\varphi_T}{U_m} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где $\varphi_T = kT/q$ — тепловой потенциал электрона.

Параметры световой вольтамперной характеристики U_m , I_m , U_{oc} – напряжения холостого хода, I_{sc} – ток короткого замыкания определяются рекомбинационными свойствами объема и поверхностей ФЭП и описываются эффективным временем жизни и диффузионной длиной неравновесных носителей заряда:

$$\frac{1}{\tau_{\text{ef}}} = \frac{1}{\tau_v} + \frac{1}{\tau_s}; \quad L_{\text{ef}} = \sqrt{D_n \tau_{\text{ef}}},$$

где D_n – коэффициент диффузии электронов в p -базе.

Для конструкций ФЭП, у которых время жизни значительно больше времени разделения (пролета базы) фотогенерированных носителей заряда

$\tau_{\text{ef}} \gg t_{\text{пр}} = d^2/2 \cdot D_n$, и диффузионная длина $L_{\text{ef}} \gg d$ потери из-за рекомбинации практически отсутствуют, и при малых R_s и R_{sh} :

$$\eta_{\text{рек}} = \left[1 + \frac{\varphi_T}{U_m} \right]^{-1} \cong 1.$$

Полная эффективность или КПД ФЭП может быть получена из (1), (2) и (3):

$$\eta_{\text{рек}} = \left[1 + \frac{R_s}{R_0} + \frac{R_0}{R_{sh}} + \frac{\varphi_T}{U_m} \right]^{-1} \eta_{\text{max}} (1 - R)(1 - T)K(\lambda)d \quad (4)$$

В структуре солнечных батарей или модулей роль омических потерь возрастает пропорционально числу последовательно включенных ФЭП, поэтому конструкция СЭ должна обеспечить минимальные величины R_s и максимальные R_{sh} , определяемые в большой степени контактными системами фронтального и тыльного электродов.

Выражение (4) для КПД солнечного элемента отражает основные требования к конструктивно-технологическим направлениям и оптимизации производства ФЭП.

В настоящее время около 90% производимых в мире СЭ для наземного применения изготавливаются из монокристаллического (Cz-Si), поликристаллического (мультикремний) и аморфного (Si:H) кремния. В качестве базового процесса принята низкоэнергетическая, низкотемпературная ($T_{\text{max}} < 950^\circ\text{C}$) с малой длительностью термических обработок (мин) RTP-технология, обеспечивающая эффективное время жизни электронов в p -базе Cz-Si элемента на уровне $(10-25) \cdot 10^{-6}$ с и диффузионную длину $L_n(140 \dots 250)$ мкм. При толщине p -базы (d) порядка 200 мкм приведенные рекомбинационные характеристики обеспечивают КПД в диапазоне $(14 \dots 18)\%$. В процессе эволюции структуры и технологических режимов были реализованы следующие направления повышения эффективности кремниевых СЭ:

- Формирование изотипного p^+ - p -перехода для снижения рекомбинации на тыльном контакте.
- Геттерирование БДП и структурных дефектов.
- Пассивация фронтальной и тыльной поверхностей для снижения рекомбинационных потерь с одновременным уменьшением толщины пластины до 180...200 мкм.
- При уменьшении толщины (d) для сохранения поглощенной световой мощности применяется текстурирование фронтальной поверхности и внутреннего отражения от тыльной и фронтальной плоскостей элемента.
- Использование конструкции с двухсторонней засветкой [4], обеспечивающей большую поглощенную

мощность за счет освещения тыльной стороны отраженным рассеянным светом.

– Структуры с односторонней и двухсторонней засветкой для систем с умеренной концентрацией солнечного излучения 30...100 солнц. СЭ с концентрированным светом имеют различные контактные системы фронтальных и тыльных электродов с малым последовательным сопротивлением R_s . Повышение эффективности в этом случае связано с увеличением не только τ_{ef} , но и η_{max} , обусловленным расширением спектра фотопоглощения в длинноволновой области в связи с уменьшением ширины запрещенной зоны $\Delta E_g(n, P, \Delta T)$ кремния и ослаблением температурной зависимости $U_{oc}(T)$.

– Значительное снижение себестоимости и цены СЭ достигается заменой пластин монокристаллического кремния поликристаллическим мультикремнием со столбчатой структурой с эффективностью на уровне 0,8...0,9 кристаллических ФЭП.

– Структура СЭ с «селективным» эмиттером, обеспечивающая повышенную чувствительность в коротковолновом диапазоне солнечного спектра с малым контактным сопротивлением металлизации.

Внедрение низкотемпературной технологии RTP, основанной на импульсной фотонной обработке пластин кремния, позволило существенно увеличить объем производства кремниевых коммерческих СЭ наземного назначения, так как малая тепловая масса в RTP-технологии обеспечивает высокие скорости нагрева и охлаждения пластин. Экспериментально подбирая режимы термообработки с максимальным и устойчиво воспроизводимым значением времени жизни τ_{ef} , параметров ФЭП I_{sc} , U_{oc} , FF и η , устанавливают базовый режим изготовления солнечных элементов. Два других процесса повышения эффективности кремниевых СЭ также связаны с термофотонной обработкой. Первый тип относится к ФЭП, имеющим структуру с заглубленным фронтальным контактом, расположенным в канавке глубиной 20...60 мкм, полученной лазерной абляцией (проплавлением) (LGBC — laser grooved buried contact). Обеспечивает повышение η на (3...4)% по сравнению с обычной технологией конвекционной термообработки в конвейерной печи [6]. Во втором случае используется лазерная абляция системы из напыленного слоя Al через пассивирующий слой SiO_2 , формирующая омический контакт из эвтектики Al-Si (силумин). Авторы [7] полагают, что расплавление и рекристаллизация локальных областей эвтектического слоя приводят к значительному уменьшению скорости рекомбинации избыточных носителей на тыльном контакте, что обеспечивает рост тока короткого замыкания и увеличение эффективности ФЭП. Такое объяснение имеет спорный характер, так как рекордные значения эффективности ФЭП были получены на структурах с пассивированными SiO_2

фронтальной и тыльной поверхностями именно за счет малой скорости поверхностной рекомбинации (PERL, PERC, PERF cells) [8].

Возможное объяснение повышения эффективности СЭ фотонной обработкой содержится в предложенной физической теории фото-электрической конверсии в однопереходных ФЭП с зарядовыми насосами [2]. Зарядовый насос представляет собой локальную область с плавающим потенциалом в объеме базы, способную пространственно разделять фотовозбужденные неравновесные носители заряда и обеспечивать их перемещение в зону действия основного коллектирующего p-n перехода. В качестве зарядовых насосов в структуре ФЭП могут быть встроенные локальные n^+ и p^+ области с плавающим потенциалом (в p- и n- базе соответственно), системы металл-полупроводник (барьер Шоттки), диэлектрик-полупроводник, МДП, локальные гетеропереходы, квантовые ямы, квантовые нити и квантовые точки.

Основной задачей зарядовых насосов является снижение рекомбинационных потерь в объеме и на поверхностях фронтального и тыльного электродов (увеличение $\eta_{рек}$) посредством не увеличения τ_{ef} за счет совершенства кристалла (Si зонной плавки), а с помощью уменьшения времени разделения (пролет базы) СЭ из дешевого «солнечного» кремния, выращенного методом Чохральского, либо мультикремния со столбчатой структурой. В случае реализации зарядовых насосов с помощью локальных n^+ -областей в p-базе с плавающим потенциалом изменяется механизм разделения и коллектирования фотогенерированных электронно-дырочных пар. В традиционной структуре n^+-p-p^+ типа носители генерируются повсюду в толщине базы и диффундируют от тыльного электрода к фронтальному. При этом время пролета структуры с толщиной 200 мкм составляет единицы мкс [9]. Максимум спектральной чувствительности соответствует λ 0,9 мкм («красная» область структуры). Если время жизни неравновесных носителей тока составляет менее 10 мкс, то при $t_{np} = \tau_{ef}$; $d = L_n$:

$$\Delta n_{рек} = \Delta n(0) - \Delta n(t_{np}) = \Delta n(d)(1 - \exp(-\frac{t_{np}}{\tau_{ef}}))$$

Примерно третья часть фотовозбужденных носителей тока разделяется фронтальным переходом, а 2/3 $n(\Phi)$ рекомбинируют. Эта оценка приводит к значению $\eta_{рек} = (0,3...0,4)$ и в соответствии с (4) общий КПД составляет (9...12)%, что и реализовывалось в 60-х ... 80-х годах прошлого столетия.

Время пролета электронами p-базы с зарядовыми насосами определяется диффузионным пролетом слоя W (неосновного носителя) (рис. 1) и временем дрейфа электронов (основных носителей) в n^+ -области толщиной h (время заряда локальной n^+ -области генерируемым фотонапряжением). Время заряда состав-

ляет величину менее 10^{-10} с, поэтому основная инерционность обусловлена временем диффузии через слой W , составляющий десятые или сотые доли общей толщины базы d . Поэтому, по сравнению с традиционной структурой, время разделения зарядов снижается на полтора-два порядка, что существенно уменьшает рекомбинационные потери. Проведенные в [9] оценки показывают, что в структуре, у которой половина площади (объема) занята зарядовыми насосами с $W=0,1d$, а другая имеет толщину p -базы d , эффективность возрастает с 15 до 21% при одинаковых рекомбинационных свойствах. С увеличением объема, занятого зарядовыми насосами до $0,7V_0$, КПД возрастает до 23,4%. Форма зарядовых насосов может быть различной: столбчатого вида, полоскового, дискретного. Топология размещения насосов в p -базе должна обеспечить малое последовательное сопротивление R_s тыльного электрода («булька с изюмом», рис. 1, б). Для этого по высоте дискретные элементы должны быть расположены вдоль перпендикуляров к тыльной поверхности (колоннами, столбами) с суммарной толщиной вертикальных зазоров $(0,1 \dots 0,2)d$. Токотенос в такой структуре будет обеспечиваться двумя потоками: диффузией электронов в объеме p -базы с толщиной d и параллельно дрейфом электронов в n^+ -областях насоса с последовательной инжекцией и диффузией через зазор p -базы (W_i) вплоть до коллектирующей фронтальной n^+ -области, формирующей внешнюю фотоздс.

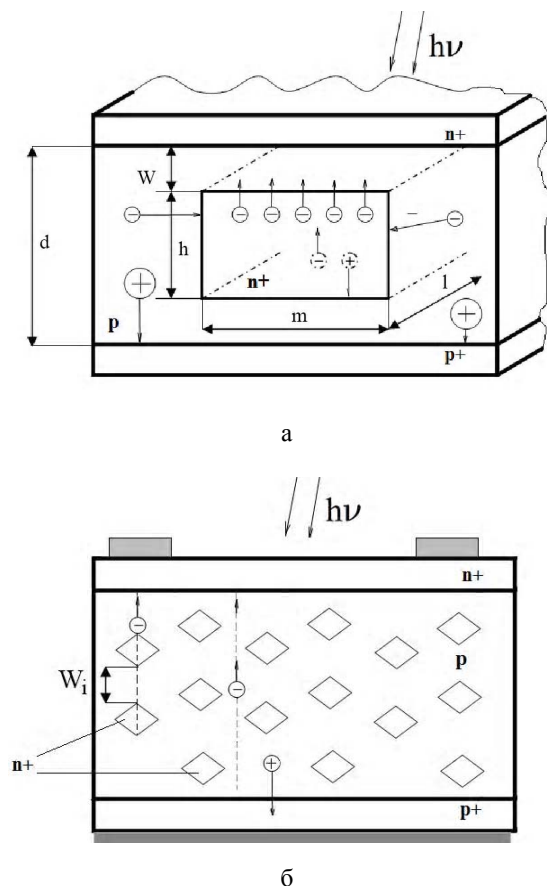


Рис. 1. Фрагменты структуры элемента фотопреобразователя с зарядовым насосом: а – полосково-столбчатого типа; б – с дискретной топологией

Типовые RTP-технологии изготовления СЭ $Cz-Si$ и мультикремния содержит высокотемпературные операции ($\sim 950^\circ C$) формирования n^+ -эмиттера, плазмохимического осаждения антиотражающего и защитного слоев SiN_x (PECVD), вжигания фронтального и тыльного электродов, пассивирующий гидрогенизирующий отжиг в форминг газе. Эти операции и латентные дефекты и зародыши генерируют ряд активных точечных дефектов: межузельные атомы кислорода, кремния, бора, водорода, азота, вакансий и их соединений, формирующих кластеры и агломераты низкотемпературных двухзарядных доноров TD1, которые включают в себя скопления атомов БДП рекомбинационного типа.

Донорный агломерат изолирован от p -матрицы контактным полем границы раздела (модель Госсика), может инвертировать тип проводимости с дырочной на электронную. В этом случае активность акцепторных рекомбинационных центров и глубоких донорных уровней БДП подавляется, что эквивалентно внутреннему геттерированию высокотемпературными кислородными преципитатами вне активного объема традиционных СБИС. Необходимым условием образования кластеров донорного типа является доминирование реакции Уоткинса по переводу узлового бора в межузельное положение атомами кремния, кислорода и их комплексов с участием ионов водорода, ускоряющих диффузию точечных дефектов. Кластеры донорного типа находятся под плавающим потенциалом и отражают дырки из окружающего объема контактным полем границы кластера и p -матрицы.

При концентрации донорных кластеров и агломератов $10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-3}$ [10] расстояние между ними при гомогенном распределении составляет 10^{-4} см , что значительно меньше диффузионной длины электронов в p -базе СЭ. При фотонном возбуждении цепочка кластеров (см. рис. 1, а) превращается в проводящий канал n -типа, в котором электроны переносятся дрейфовым механизмом, аналогично встроенному легирующим примесям зарядовому насосу [11]. Низкотемпературное формирование n -области в $Cz-Si$ p -типа наблюдалось в [12] при травлении в плазме Ar также посредством кластеров термодоноров TD1. Фотонная деградация и регенерация СЭ из $Cz-Si$ [10] могут быть инициированы перестройкой донорных кластеров TD1 в нейтральные с активацией рекомбинационных глубоких акцепторных и донорных центров, приводящих не только к уменьшению объемного времени жизни, но и к подавлению эффективности элемента зарядового насоса. Восстановление донорной природы кластера термоотжигом $T=210^\circ C$, $t=10$ мин или регенерацией при повышенной температуре $120^\circ C < T < 190^\circ C$ с фотонной или электрической инжекцией в темноте возвращает эффективность конверсии СЭ [10].

Примесные «атмосферы» дислокационных колоний могут содержать избыточную концентрацию донорных центров (кислородные доноры, водородные H^+ , литиевые Li^+ и др.) и формировать локальные n -

области с плавающим потенциалом в p -базе, выполняющие роль зарядовых насосов.

Необходимым условием контролируемого введения локальных областей зарядовых насосов является пространственная дискретность термофотонного воздействия, которое создает сотни или тысячи областей с возбужденными конденсированными системами, где индуцируются локальные градиенты температуры, внутренних механических напряжений, концентрации фотоносителей и релаксирующих по законам нанотехнологии с перестройкой структуры, обеспечивающей минимизацию внутренней энергии кристалла.

В процессе управления дефектообразованием термофотонной обработкой в объеме p -базы СЭ могут формироваться гетерогенные по рекомбинационным свойствам (τ_{ni}) локальные области за счет внутреннего геттерирования рекомбинационных БДП. Пространственное чередование этих областей формирует структуру с направленным перемещением (дрейфом-диффузией) неосновных носителей заряда, индуцируемых излучением. Области с большим значением τ_{ni} (прилегающие и охватывающие объем пространственного дефекта), очищенные от рекомбинационных центров, фотогенерируют большие величины избыточных носителей заряда

$$\Delta n_{Fi} = G \tau_{ni},$$

где G – темп фотогенерации.

Пространственная неоднородность по толщине базы избыточной концентрации при наличии мощного стока на фронтальной поверхности (ОПЗ p - n перехода) будет способствовать направленной диффузии – дрейфу и уменьшению рекомбинационных потерь. При этом конфигурация и размеры структурных дефектов имеют существенное значение. Так, столбчатая структура мультикремниевых пластин позволяет реализовать интегральные (по площади) значения времени жизни одного порядка с кристаллическим кремнием Cz - Si , хотя они имеют на 3...4 порядка больше рекомбинационных примесей.

Другим источником неоднородной фотогенерации является зависимость характерной длины поглощения излучения $X_0(\lambda) = \alpha(\lambda)^{-1}$ от энергии фотона или длины волны. Экспоненциальное падение с толщиной темпа фотогенерации всего спектра солнечного излучения коллектирующим электроны p - n переходом вблизи тыльного электрода (тандемный СЭ) обеспечивает направленный дрейф-диффузию электронов от фронтальной поверхности к тыльной. Эти два типа насосов могут быть отнесены к зарядовым насосам, активируемым внешним воздействием.

2. Экспериментальная часть

Проведены экспериментальные исследования на опытных образцах СЭ с зарядовой подкачкой, формируемых введением в структуру ФЭП быстро диффундирующих примесей донорного типа (Li^+ , H^+ , SiO_n^+).

Образцы ФЭП изготавливались из кремния p -типа проводимости КДБ7,5 (100), толщина пластин составляла 340-350 мкм. Коллекторный n^+ - p - и контактный тыльный p - p переходы формировались с помощью пленок на основе ТЭОСа быстрым фотонным отжигом по методике, изложенной в [14]. Перед формированием контактной разводки поверхность пластин подвергалась термическому окислению. Металлические контакты формировались методами стандартной шелкографии. Топология металлического контакта с тыльной стороны пластины формировалась той же маской, что и лицевой контакт. Общая площадь ФЭП структуры составляла 5 Ч 2,5 см². На следующем этапе на тыльную сторону пластины через металлическую маску производилось локальное напыление пленки лития. Маска представляла собой пластину из нержавеющей стали соответствующего размера со сквозными щелями в виде полосок, которые расположены между контактными полосками ФЭП. Напыление лития проводилось в вакууме 1,3 Ч 10⁻² Па из резистивного испарителя, толщина металлической пленки составляла $2 \pm 0,5$ мкм. После извлечения из вакуумной камеры пластина помещалась в установку фотонного отжига на воздухе по методике, изложенной в [14]. В результате в структуре базового p -слоя формируются встроенные n^+ области полоскового типа.

Выбор лития связан с низкой температурой его введения и его способностью осаждения в рекомбинационных преципитатах, приводящей к подавлению темпа локальной рекомбинации, а значит к увеличению тока короткого замыкания. Предельная диффузионная растворимость Li в Si может достигать уровня 10¹⁹ см⁻³ при температуре около 670°С [15]. Для создания n^+ -областей концентрационный профиль “ n ”-типа примеси должен быть таким, чтобы не перекомпенсировать уровень легирования приконтактного p^+ слоя, и наоборот, возможно сильнее перекомпенсировать уровень легирования p базы, а глубина легирования выбиралась такой, чтобы не происходило диффузионного перекрытия n^+ -областей в латеральном направлении и закорачивания коллекторного и тыльного слоев. Зарядовые насосы в виде n^+ областей в базе p типа проводимости в экспериментальной структуре ФЭП формировались в следующем режиме фотонного отжига: мощность ламп нагрева $P = 37$ Вт/см², время 20 с. Глубина диффузии лития, определенная по глубине залегания n^+ - p перехода в этом режиме, составила $h = 158 \pm 5$ мкм.

На рис.2 представлены ВАХ экспериментальных ФЭП структур при стандартизованной освещенности поверхности (АМ1.5).

Видно, что введение в структуру ФЭП зарядовых насосов по предложенной схеме позволяет увеличить значение тока короткого замыкания с $I_{sc} = 274$ мА у исходной структуры до $I_{sc} = 354$ мА в структуре СЭ с зарядовыми насосами (СЭЗН). Величина напряжения холостого хода у исходных структур $U_{oc} = 0,565$ В и несколько выше для СЭЗН структур, $U_{oc} = 0,577$ В. С

другой стороны, для СЭЗН структур заметно уменьшение фактора заполнения FF . Это, вероятнее всего, является следствием увеличения резистивных потерь на тыльном контакте в рассмотренном варианте экспериментальной ФЭП структуры и требует дальнейшей оптимизации её конструктивно-технологического исполнения.

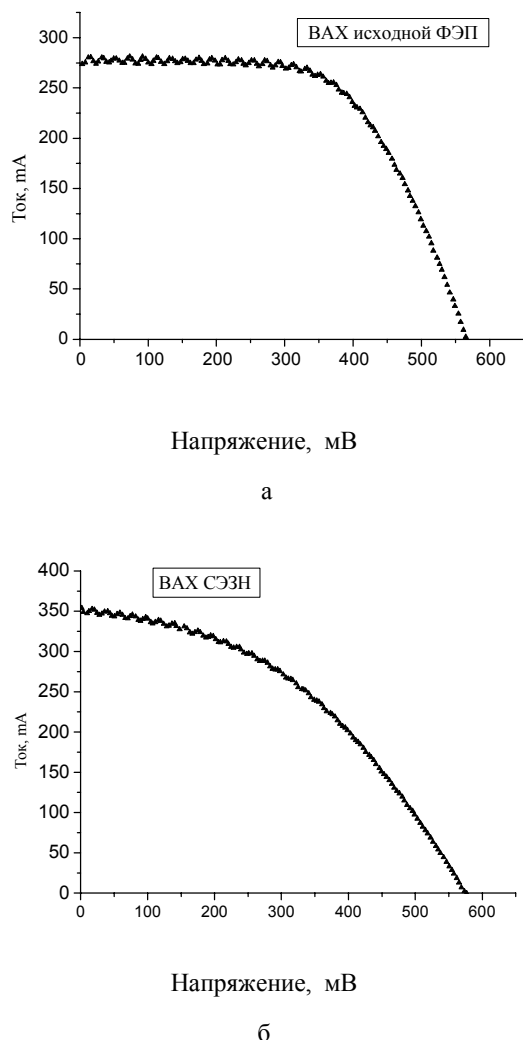


Рис. 2. Световые вольтамперные характеристики экспериментальных ФЭП: а) ВАХ исходной структуры ФЭП; б) ВАХ той же ФЭП после формирования зарядовых насосов

Экспериментальное подтверждение механизмов проводимости в «ростовых» локальных зарядовых насосах [11] на основе СЭ RGS (Ribbon Growth on Substrate) со столбчатой структурой свидетельствует о квазипериодическом пространственном распределении токопроводящих каналов в монокристаллических зернах кремния. Аналогичная локальная дрейфовая электронная проводимость наблюдалась в коллектирующих токовых каналах в работе [13] и других публикациях. Это обстоятельство позволяет предположить, что для интенсификации класстеризации и формирования протяженных структур дефектов преципитатно-дислокационных комплексов донорного типа (p -матрица) с инверсным по отношению к матрице типом проводимости целесообразно в технологии изготав-

ления СЭ вводить локальную термофотонную обработку множеством пространственно дискретных локальных пучков света или лазера.

Целью экспериментальных исследований являлось подтверждение факта увеличения тока короткого замыкания I_{sc} и максимальной мощности P_m после проведения локальной фототермической обработки образцов ФЭП различных производителей (Россия, Китай) с интегральной эффективностью $\eta = (13...18)\%$.

Опытные образцы вырезались из готовых пластин СЭ алмазным инструментом с площадью от 4 до 25 см^2 . Фотонный отжиг осуществлялся на модифицированной установке фотонного отжига «Импульс-5» с фототрафаретом-коллиматором, обеспечивающим пространственную дискретность световых пучков. Коллиматор выполнен из отполированной пластины нержавеющей стали толщиной 6 мм и набором отверстий с диаметром 1,0 мм с шагом 4 мм (рис. 3).

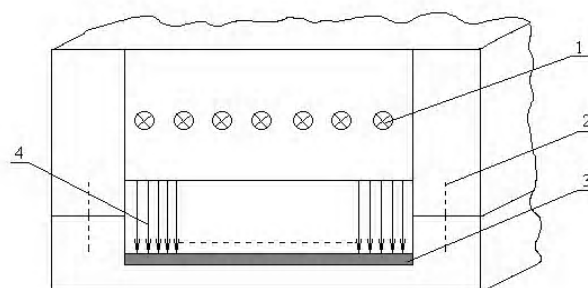


Рис. 3. Упрощенная схема установки локальной фотонной обработки: 1 – галогенные лампы Rx7S1500W — 9 шт.; 2 – корпус фототрафарета-коллиматора; 3 – пластина солнечного элемента; 4 – локальные пучки излучений

Установка обеспечивала облучение образцов площадью $(5 \times 5) \text{ см}^2$ с удельной световой мощностью излучателей $40...45 \text{ Вт/см}^2$. Спектр излучения определялся типом галогенных ламп Rx7S1500W от ультрафиолета в вакууме до инфракрасного, соответствующего температуре черного тела 3000K. Предварительное измерение параметров пластин СЭ $(12,5 \times 12,5) \text{ см}^2$ проводилось на тестере PASAN900 с импульсным источником излучения в условиях AM1,5; $T = 25^\circ\text{C}$. Измерения опытных образцов осуществлялось на установке, обеспечивающей условия AM1,5 $P_{\text{изл}} = 100 \text{ мВт/см}^2$ со спектром галогенной лампы, ток короткого замыкания до 1,5 А, максимальная мощность до 10 Вт. Релаксационные термический и инжекционный отжиги проводились при температурах $200^\circ\text{C}...350^\circ\text{C}$ длительностью $t = 10...60 \text{ мин}$. В зависимости от длительности фотонного импульса от 5 до 30с, $P = 44 \text{ Вт/см}^2$, изменение $\Delta P_m/P_{m0}$ составляло от 3 до 35 % с максимумом в интервале $t_{\text{и}} = (8...13) \text{ с}$. При этом максимальное возрастание тока короткого замыкания $\Delta I_{sc}/I_{sc0} \approx 37,0\%$ наблюдалось у образцов с малой исходной эффективностью $\eta < 15\%$. У образцов с эффективностью $\eta \geq 17\%$ и плотностью тока короткого замыкания $j_{sc} > 35 \text{ мА/см}^2$ величина $\Delta P_m/P_{m0}$ составляла $(7...15)\%$.

При длительности фотонного импульса более 20с в некоторых образцах происходила деградация (уменьшение I_{sc} и P_m) до 50% и более. Было замечено, что более подвержены деградации образцы с малой площадью, что объясняется перегревом структуры и формированием шунтов с малым сопротивлением R_{sh} . При длительности фотонного импульса более 50с деградируют образцы и с максимальной площадью $(5 \times 5) \text{ см}^2$.

Разброс относительного изменения I_{sk} у группы образцов из одной пластины СЭ при одной длительности фотонного отжига уменьшался при проведении инжекционного отжига при температуре 190°C в течение 30..45 мин и плотности прямого тока $j = (50..100) \text{ мА/см}^2$. Отсутствие достоверной информации по технологии изготовления конкретных пластин СЭ не позволяет делать бесспорных выводов о природе увеличения тока короткого замыкания у ФЭП, подверженных локальной термофотонной обработке. Однако, как гипотеза, проведенные эксперименты могут свидетельствовать о повышении эффективности конверсии ФЭП вследствие увеличения плотности локальных кластерных агломератов донорного типа, играющих роль зарядовых насосов.

Применение обнаруженного эффекта увеличения тока короткого замыкания и максимальной мощности ФЭП локальной фотонной обработкой на большие площади СЭ будет способствовать созданию элементной базы гелиоэнергетики повышенной эффективности ($\eta > 20\%$) с гигаваттным объемом установленной мощности.

Выводы

Снижение рекомбинационных потерь в пластинах СЭ достигнуто благодаря уменьшению времени разделения фотогенерированных носителей тока за счет структуры с зарядовыми насосами, реализованными дефектно-примесной инженерией.

Предложена схема реализации технологического процесса создания экспериментальной структуры СЭ с зарядовыми насосами. Экспериментальные исследования подтвердили факт увеличения тока короткого замыкания и максимальной мощности после проведения локальной фототермической обработки образцов ФЭП различных производителей.

Научная новизна работы состоит в том, что применение коротковременной технологии термофотонной и лазерной обработки пластин кремния приводит к качественному изменению механизма пролёта базы фотопреобразователя за счет образования пространственных дефектно-примесных комплексов. *Практическая значимость* экспериментальных исследований заключается в получении схемы реализации техпроцесса создания структур с зарядовыми насосами. Проведенные эксперименты свидетельствуют о повышении эффективности конверсии ФЭП со структурой с зарядовыми насосами. *Дальнейшие исследования* целесообразно направить на отработку технологического процесса формирования ФЭП с зарядовыми насосами.

Литература: 1. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. М.: Мир, 1984. 475с. 2. Гусев В.А. Фотопреобразователи на основе зарядовых насосов // Вестник СевНТУ. Сер. Информатика, электроника, связь. 2011. №114. С.199- 203. 3. Фаренбух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат, 1987. 280с. 4. Унтила Г.Г., Кост Т.Н., Чебатарева А.Б. и др. Солнечный элемент из кремния *n*- типа, двусторонний, концентраторный // ФТП. 2012. Т. 46, № 9. С. 1217-1223. 5. Непомнящих А.И. Прямое получение мультикремния для солнечной энергетики из высокочистого рафинированного кремния // Труды научн.-техн. конф. Кремний-2012. С.Петербург. 9-13 июля 2012. С. 137-139. 6. Jordan D. Nagle J.P. New generation of high-efficiency solar cells: development, processing and marketing // Prog. in Photovoltaics. 1994. Vol.2. P. 171-176. 7. Myller I, Bothe K., Gatz S. Recombination at local aluminum-alloyed silicon solar cell base contacts // Energy Procedia 8. 2011. P. 337-342. 8. Green M.A. Hansen J. Catalogue of Photovoltaic Drawings // Photovoltaics Special Research Centre, University of New South Wales. 1998. 9. Гусев В.А. Старков В.В., Шоферистов С.Е. Повышение эффективности фотопреобразователей с зарядовыми насосами // Вестник СевНТУ. Серия: информатика, электроника, связь. №. 131. 2012. С. 102-107. 10. Heruth A., Schubert G., Kaes M., Hahn G. Avoiding Boron-Oxygen related Degradation in Highly Boron Doped Cz Silicon // Proc. 21st EU PVSEC. 2006. P. 530-537. 11. Breitenstein D. EBIC investigation of a 3-Dimensional Network of Inversion Channels in SolarCell on Silicon Ribbons// Solid State Phenomena. 2001. P. 78 —79. 12. Buzynin A.N. Non-equilibrium impurity redistribution in Si// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, T. 2002. 188. P. 366-370. 13. Buonassisi T., Vyvenko O.F., Istratov A.A. et al. Observation of transition metals at shunt locations in multicrystalline silicon solar cells // Journal of Applied Physics. 2004. Vol.95. №36. P. 1556-1558. 14. Кравченко В.А., Старков В.В., Амбросимов Н.В., Амбросимова В.Н. Диффузионное легирование кремния бором и фосфором в условиях быстрого термического отжига // Электронная техника. Сер. Материалы. 1989. № 4(241). С.20-23. 15. Reiss H., Fuller C.S. et al. Solubility of Lithium in Doped and Undoped Silicon, Evidence for Compound Formation // J. Chem. Phys. 1956. Vol. 25. №4. P.650-655.

Поступила в редколлегию 10.08.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Бабуров Э.Ф.

Гусев Владимир Александрович, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. «Электронная техника» Севастопольского национального технического университета. Адрес: Украина, 99053, Севастополь, ул. Университетская, 33, тел. (0692)-435-127, e-mail: elt.sevntu@gmail.com.

Старков Виталий Васильевич, ст. науч. сотрудник, канд. тех. наук, Учреждение Российской академии наук, Институт проблем технологии микроэлектроники и особых чистых материалов РАН. Адрес: Россия, 142432, Московская область, Черноголовка, ул. Институтская, 6, e-mail: starka@iptm.ru.

Шоферистов Сергей Евгеньевич, частное предприятие «Внедренческая экспериментальная лаборатория». Адрес: Киев, Украина, ул. Северо-Сырецкая, 3, 04136, e-mail: mail@wel.net.ua.

Мурзин Дмитрий Геннадьевич, канд. тех. наук, ст. преп. каф. «Электронная техника» Севастопольского национального технического университета. Адрес: Украина, 99053, Севастополь, ул. Университетская, 33, т. раб. (0692)-435-127. E-mail: elt.sevntu@gmail.com.



МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ БАЗА УПРАВЛЕНИЯ БИТОВОЙ СКОРОСТЬЮ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПРЕДСКАЗАННЫХ КАДРОВ

БАРАННИК В.В., ХАРЧЕНКО Н.А.,
БЕКИРОВ А.Э.

Строится методологическая база для управления битовой скоростью сжатой видеоинформации, что необходимо для ее адаптации относительно пропускной способности канала в телекоммуникационной сети. Разрабатываются выражения, позволяющие оценить объем передаваемых данных сжатого видеопотока для предсказанных кадров при различных вариантах выбора типа формируемых блоков. Учитываются следующие параметры: особенность цветовой модели, формат представления цветового пространства, тип кодирования видеоданных, размер блока и макроблока в кадре.

Введение

Передача цифрового видео от источника (видеокамера или записанный видеоролик) к получателю (видео-дисплей) вовлекает в работу целую цепь различных компонентов и процессов. Ключевыми звеньями этой цепи являются процессы компрессии (кодирования) и декомпрессии (декодирования). Здесь изначальный частотоемкий цифровой видеосигнал сокращается до размеров, подходящих для его дальнейшей передачи или хранения. Новые улучшенные разработки процессов компрессии и декомпрессии могут дать существенное коммерческое и техническое преимущество продукта. При этом обеспечивается лучшее качество видеоизображения, большая надежность и/или гибкая приспособляемость по сравнению с уже существующими решениями. Однако наряду с параметрами сжатия необходимо также вводить контроль битовой скорости видеопотока, который поступает в канал связи. Это обусловлено тем, что при обработке разных типов кадров формируется неравномерное количество бит на кадр. Это приводит к возникновению пульсации трафика, что негативно влияет на функционирование сети передачи данных. Поэтому есть необходимость в разработке алгоритма управления битовой скоростью видеопотока и его согласования с характеристиками ТКС. В работах [3,4] создан алгоритм обработки Р-кадров, который основан на использовании двух типов сегментов, выбираемых по заданному пределу с учетом функционала, оценивающего информативность полиадического кодирования на заключительном этапе сжатия видеоданных. По сравнению со стандарт-

ными методами кодирования он является предпочтительным. Однако для него отсутствует методологическая база оценки битовой скорости видеопотока в расчете на один кадр, разработка которой и является целью данной работы.

Основная часть

В [4] приведен алгоритм обработки блоков яркостной и цветоразностных составляющих представления предсказанного кадра. Определены длины кодовой последовательности передаваемых данных после сжатия для одного блока. Для яркостной составляющей блока $B(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ она определяется выражением:

$$d(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)} = \begin{cases} d(P, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)} = d(P, Y)_{t, \inf}^{(\xi, \gamma)} + \\ + d(P, Y)_{t, s}^{(\xi, \gamma)}, \rightarrow f(E(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}) \leq \Delta D; \\ d(I, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)} = d(I, Y)_{t, \inf}^{(\xi, \gamma)} + \\ + d(I, Y)_{t, s}^{(\xi, \gamma)}, \rightarrow f(E(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}) > \Delta D, \end{cases} \quad (1)$$

где $d(P, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ – длина кодовой последовательности сжатых данных для Р-блока; $d(I, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ – длина кодовой последовательности сжатых данных для I-блока; $d(I, Y)_{t, s}^{(\xi, \gamma)}$ и $d(P, Y)_{t, s}^{(\xi, \gamma)}$ – служебные части для блоков типа I и P; $d(I, Y)_{t, \inf}^{(\xi, \gamma)}$ и $d(P, Y)_{t, \inf}^{(\xi, \gamma)}$ – длины кодового представления всех столбцов блоков типа I и P; (ξ, γ) – координаты макроблока в кадре, $\xi = \overline{1, m_{mc}}$; $\gamma = \overline{1, n_{mc}}$, здесь m_{mc} и n_{mc} – количество макроблоков в кадре по горизонтали и вертикали; (k, l) – координаты блока в макроблоке, $k = \overline{1, 2}$; $l = \overline{1, 2}$; t – номер текущего обрабатываемого кадра.

Процесс формирования кодовой последовательности для блока $B(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ показан на рис. 1.

Соответственно количество разрядов для блоков $B(t, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ и $B(t, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ после полиадического кодирования определяется следующими выражениями:

$$\begin{aligned} d(P, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)} &= d(P, C_r)_{t, s}^{(\xi, \gamma)} + d(P, C_r)_{t, \inf}^{(\xi, \gamma)}, \\ d(P, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)} &= d(P, C_b)_{t, s}^{(\xi, \gamma)} + d(P, C_b)_{t, \inf}^{(\xi, \gamma)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $d(P, C_r)_{t, \inf}^{(\xi, \gamma)}$, $d(P, C_b)_{t, \inf}^{(\xi, \gamma)}$ – длины информационной части соответственно для хроматической красной и хроматической синей составляющей; $d(P, C_r)_{t, s}^{(\xi, \gamma)}$, $d(P, C_b)_{t, s}^{(\xi, \gamma)}$ – длина служебной части соответственно для хроматической красной и хроматической синей составляющей.

Процесс формирования кодовой последовательности для блоков $B(t, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ и $B(t, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ показан на рис. 2.

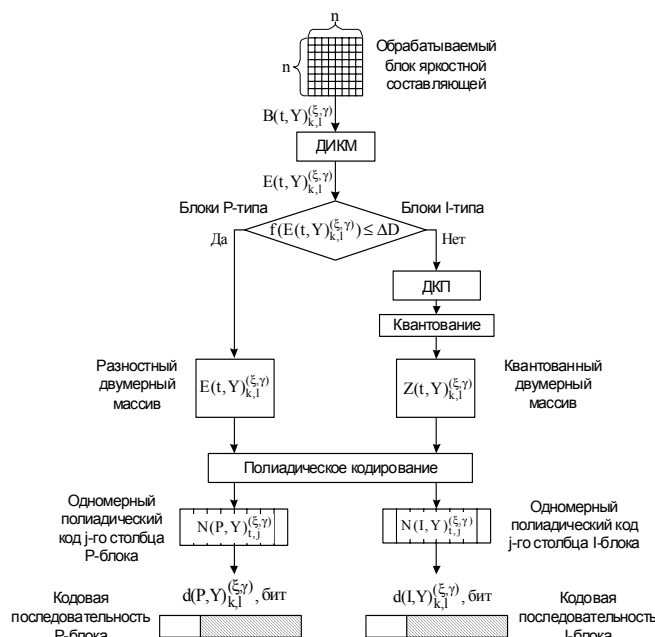


Рис. 1. Преобразование блока яркостной составляющей в кодовую последовательность

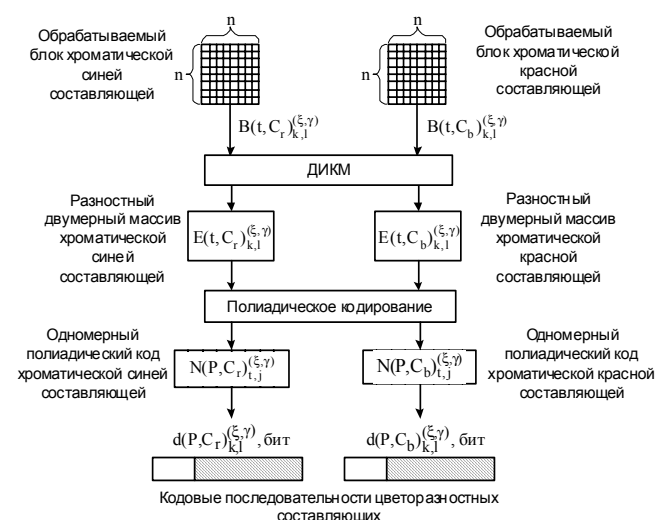


Рис. 2. Преобразование блоков цветоразностных составляющих в кодовую последовательность

При определении общего объема передаваемых данных нужно также учитывать цифровой формат макроблока видеоданных. Применяют три основных формата видео в зависимости от его назначения: 4:4:4, 4:2:2 и 4:2:0.

Как было описано ранее, макроблок после преобразования цветового пространства представляет собой совокупность сигнала яркости Y и двух цветоразностных сигналов C_r и C_b . Вариации их значений допускают 256 градаций (от 0 до 255 для Y и от -128 до 127 для C_r/C_b), что в двоичном исчислении соответствует 8 битам или 1 байту. Теоретически каждый элемент кадра имеет собственные значения YC_rC_b , т.е. требует 3 байта. Такое представление, когда как яркость, так и сигналы цветности имеют равное число независимых значений, обычно обозначают как 4:4:4 (рис. 3).

С учетом меньшей чувствительности зрительной системы человека к цветоразностным компонентам без видимой потери качества число цветовых отсчетов в каждой строке можно уменьшить вдвое.

Именно такое представление, обозначаемое как 4:2:2, было принято в вещательном телевидении. При этом для передачи полного значения телевизионного сигнала в каждом отсчете кадра достаточно 2 байта (чередуя через отсчет независимые значения C_r и C_b).

Более того, для целей потребительского видео признано допустимым уменьшение вдвое и вертикального цветового разрешения, т.е. переход к представлению 4:2:0. Это уменьшает приведенное число байт на отсчет до 1,5. Именно такое представление было заложено в DV-формат цифровых камер, а также формат DVD-видео.

Для учета дифференцированного влияния цифрового формата на объем битового описания кадра введем понятие структурной единицы кадра.

Определение. Структурной единицей кадра будем называть такую структуру, которая формируется на основе макроблоков по одному от каждой составляющей цветовой модели. Структурная единица $S(t)_{\text{пoo}}^{(\xi, \gamma)}$ задается следующей формулой:

$$S(t)_{\text{пoo}}^{(\xi, \gamma)} = S(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)} \cup S(t, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)} \cup S(t, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}, \quad (3)$$

где $S(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ – макроблок яркостной составляющей для текущего Р-кадра; $S(t, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ и $S(t, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ – цветоразностные составляющие, представленные соответственно хроматической красной и хроматической синей; (ξ, γ) – координаты макроблока в кадре, $\xi = \overline{1, m_{\text{mc}}}$; $\gamma = \overline{1, n_{\text{mc}}}$, здесь m_{mc} и n_{mc} – количество макроблоков в кадре по горизонтали и вертикали; t – номер текущего обрабатываемого кадра.

Определим количество бит, затраченное на представление одного макроблока, которое равно суммарному количеству бит на представление входящих в него блоков:

$$\begin{aligned} d(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)} &= \sum_{k=1}^{m_c} \sum_{l=1}^{n_c} d(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}; \\ d(t, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)} &= \sum_{k=1}^{m_c} \sum_{l=1}^{n_c} d(P, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}; \\ d(t, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)} &= \sum_{k=1}^{m_c} \sum_{l=1}^{n_c} d(P, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $d(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$, $d(P, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ и $d(P, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ – соответственно объемы в битах для блоков $B(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$, $B(t, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ и $B(t, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ для (ξ, γ) -х макроблоков яркостной и цветоразностных составляющих Р-кадра; m_c – количество сегментов в макросегменте по горизонтали; n_c – количество сегментов в макросегменте по вертикали.

Тогда общие объемы составляющих цветовой модели для одного кадра представляют собой суммарные объемы цифрового описания макроблоков $d(t, Y)^{(\xi, \gamma)}$, $d(t, C_r)^{(\xi, \gamma)}$, $d(t, C_b)^{(\xi, \gamma)}$. В соответствии с этим битовый объем составляющих цветовой модели будет определяться следующими выражениями:

$$\begin{aligned} D(t, Y) &= \sum_{\xi=1}^{m_{mc}} \sum_{\gamma=1}^{n_{mc}} d(t, Y)^{(\xi, \gamma)}; \\ D(t, C_r) &= \sum_{\xi=1}^{m_{mc}} \sum_{\gamma=1}^{n_{mc}} d(t, C_r)^{(\xi, \gamma)}; \\ D(t, C_b) &= \sum_{\xi=1}^{m_{mc}} \sum_{\gamma=1}^{n_{mc}} d(t, C_b)^{(\xi, \gamma)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где m_{mc} и n_{mc} – количество макроблоков в кадре по горизонтали и вертикали.

Суммарная длина $D(t)$ кодовой последовательности цифрового описания составляющих цветовой модели на один Р-кадр определяется выражением:

$$D(t) = D(t, Y) + D(t, C_r) + D(t, C_b), \quad (6)$$

здесь $D(t, Y)$ – количество бит на представление яркостных составляющих цветовой модели; $D(t, C_r)$, $D(t, C_b)$ – количество бит на представление хроматических составляющих кадра.

С учетом соотношений (5) выражение (6) для величины $D(t)$ примет вид

$$\begin{aligned} D(t) &= \sum_{\xi=1}^{m_{mc}} \sum_{\gamma=1}^{n_{mc}} d(t, Y)^{(\xi, \gamma)} + \sum_{\xi=1}^{m_{mc}} \sum_{\gamma=1}^{n_{mc}} d(t, C_r)^{(\xi, \gamma)} + \\ &+ \sum_{\xi=1}^{m_{mc}} \sum_{\gamma=1}^{n_{mc}} d(t, C_b)^{(\xi, \gamma)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Из рис. 3 видно, что объемы составляющих кадра определяются форматом представления цветного пространства. Значит, объем цифрового описания $d(t)^{(\xi, \gamma)}$ для структурной единицы $S(t)^{(\xi, \gamma)}$ зависит от объемов входящих в нее макроблоков и соответственно объемов цифрового описания входящих в структурную единицу блоков:

$$d(t)^{(\xi, \gamma)} = \sum_{k=1}^{m_c} \sum_{l=1}^{n_c} \left(d(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)} + d(P, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)} + d(P, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)} \right). \quad (8)$$

Тогда объем передаваемых видеоданных в расчете на один кадр $D(t)$ определяется затратами количества бит на представление всех структурных единиц $d(t)^{(\xi, \gamma)}$ кадра с учетом форматов представления цветного пространства.

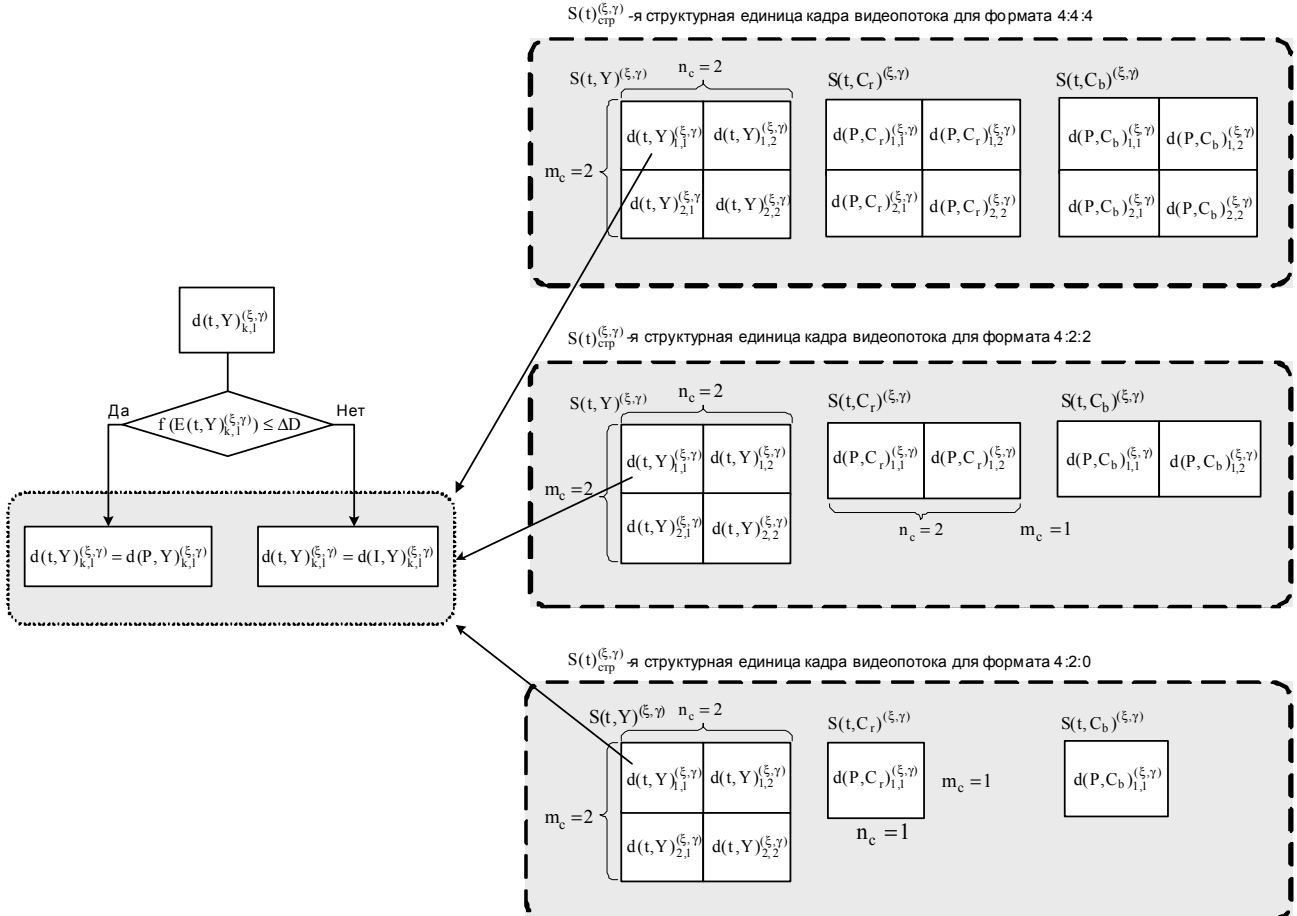


Рис. 3. Формирование структурной единицы кадра видеопотока с учетом цифровых форматов видео

Выражения (1), (2) для определения объема видеопотока в расчете на один кадр, с учетом выражений (7), (8), принимает вид:

$$D(t) = \sum_{\xi=1}^{m_{mc}} \sum_{\gamma=1}^{n_{mc}} \left(\sum_{k=1}^{m_c} \sum_{l=1}^{n_c} d(t, Y)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + \sum_{k=1}^{m_c} \sum_{l=1}^{n_c} d(P, C_r)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + \sum_{k=1}^{m_c} \sum_{l=1}^{n_c} d(P, C_b)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} \right), \quad (9)$$

Так как при выборе формата представления цветовой модели яркостная составляющая включает все блоки, а изменяются только цветные составляющие, соотношение (9) будет иметь следующий вид:

$$D(t) = \sum_{\xi=1}^{m_{mc}} \sum_{\gamma=1}^{n_{mc}} d(t, Y)^{(\xi,\gamma)} + \sum_{\xi=1}^{m_{mc}} \sum_{\gamma=1}^{n_{mc}} \left(\sum_{k=1}^{m_c} \sum_{l=1}^{n_c} d(P, C_r)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + \sum_{k=1}^{m_c} \sum_{l=1}^{n_c} d(P, C_b)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} \right). \quad (10)$$

Для формата представления цветного пространства 4:4:4, количество элементов яркостной и хроматических составляющих кадра видеопотока сохранены в полном составе (см. рис. 3), поэтому при $m_c = 2$, $n_c = 2$, объем цифрового описания будет определяться выражением:

$$d(t)_{\text{н\ddot{o}o}}^{(\xi,\gamma)} = \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \left(d(t, Y)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + d(P, C_r)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + d(P, C_b)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} \right).$$

Объем $D(t)$ потока видеоданных в расчете на один кадр соответствует выражению (10). Количество строк и столбцов в макроблоке остается неизменным, т.е. $m_c = 2$, $n_c = 2$ для хроматических составляющих C_r и C_b . Тогда выражение (10) примет вид:

$$D(t) = \sum_{\xi=1}^{m_{mc}} \sum_{\gamma=1}^{n_{mc}} \left(\sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \left(d(t, Y)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + d(P, C_r)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + d(P, C_b)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} \right) \right).$$

Для формата представления цветного пространства 4:2:2, горизонтальная выборка хроматических составляющих изображения уменьшится в два раза по сравнению с яркостной составляющей. В этом случае объем цифрового описания структурной единицы определяется как:

$$d(t)_{\text{н\ddot{o}o}}^{(\xi,\gamma)} = d(t, Y)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + \sum_{l=1}^2 \left(d(P, C_r)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + d(P, C_b)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} \right).$$

С учетом особенностей формата представления цветного пространства 4:2:2, когда из макроблоков обеих цветных составляющих исключается вторая строка,

т.е. $m_c = 1$, $n_c = 2$, выражение (10) для объема $D(t)$ потока в расчете на кадр примет вид

$$D(t) = \sum_{\xi=1}^{m_{mc}} \sum_{\gamma=1}^{n_{mc}} \left(\sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \left(d(t, Y)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + d(P, C_r)_{l,1}^{(\xi,\gamma)} + d(P, C_b)_{l,1}^{(\xi,\gamma)} \right) \right).$$

При использовании формата цветного пространства 4:2:0 хроматические составляющие C_r и C_b цветовой модели представлены одним блоком первой четверти, в макроблоке отбрасывается вторая строка и второй столбец, т.е. $m_c = n_c = 1$ (см. рис. 3). Для данного формата объем цифрового описания структурной единицы определяется следующей формулой:

$$d(t)_{\text{н\ddot{o}o}}^{(\xi,\gamma)} = d(t, Y)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + d(P, C_r)_{l,1}^{(\xi,\gamma)} + d(P, C_b)_{l,1}^{(\xi,\gamma)}.$$

Выражение $D(t)$ для формата представления цветного пространства 4:2:0 примет вид

$$D(t) = \sum_{\xi=1}^{m_{mc}} \sum_{\gamma=1}^{n_{mc}} \left(\sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \left(d(t, Y)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + d(P, C_r)_{l,1}^{(\xi,\gamma)} + d(P, C_b)_{l,1}^{(\xi,\gamma)} \right) \right).$$

Таким образом, получены выражения для оценки объема передаваемого видеопотока в расчете на один кадр Р-типа с учетом различных цифровых форматов представления цветного пространства и выбора типа обработки блоков.

Выводы

Разработана методологическая база для управления битовой скоростью сжатого видеопотока. При этом:

- разработана схема обработки блоков яркостной составляющей с помощью двух способов: ДКП как I-тип или ДИКМ как Р-тип. Цветоразностные составляющие будут обрабатываться только с помощью ДИКМ;

- определено количество бит, затраченное на представление одного блока и макроблока для всех составляющих цветовой модели при полиадическом кодировании для блоков Р- и I-типа;

- введено понятие структурной единицы кадра, которая формируется на основе макроблоков по одному от каждой составляющей цветовой модели, и определен ее объем для трех вариантов реализации цифрового формата видео;

- определен общий объем $D(t)$ потока данных в расчете на один кадр в зависимости от выбора цифрового формата макроблоков цветовой модели;

Данные выражения позволяют провести оценку битовой скорости видеопотока для одного кадра с учетом изменения таких параметров как цифровой

формат цветового пространства, размер и тип блоков в кадре, итоговое кодирование данных.

Полученные выражения были сформированы для предсказанных Р-кадров, так как большая часть видеоданных кодируется именно в этом формате, что позволяет устранять временную избыточность и значительно уменьшать количество передаваемой информации.

Таким образом, созданная методологическая база позволяет построить систему управления битовой скоростью видеопотока, что особенно актуально в сетях передачи данных с низкой пропускной способностью канала при малом времени обработки видеоизображений или ограниченных вычислительных возможностях устройств обработки, например реализация служб IP-TV или on-line конференций, передача данных по беспроводным Wi-Fi сетям и т.д.

Литература: 1. *Ричардсон Ян*. Видеокодирование. Н.264 и MPEG-4 - стандарты нового поколения. М.: Техносфера, 2005. 368 с. 2. *Харченко Н.А.* Метод компрессии видеопотока на основе полиадического кодирования предсказываемых кадров / Н.А. Харченко, В.Н. Кривонос // Радио-

электроника и информатика. 2013. №1. С. 21–28. 3. *Харченко Н.А.* Метод реконструкции предсказываемых кадров в телекоммуникационных технологиях кодирования видеотрафика / Н.А. Харченко // Сучасна спеціальна техніка. К.: МВС ДНДІ, науково-практичний журнал. 2012. Вип. 4. С. 17–25.

Поступила в редколлегию 12.08.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Сидорович О.Е.

Баранник Владимир Викторович, д-р техн. наук, профессор, начальник кафедры Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: обработка информации в инфокоммуникационных системах. Адрес: Украина, 61166, Харьков, ул. Сумская, 77/79, тел. (057) 704-96-53. E-mail: barannik_v_v@mail.ru.

Харченко Наталия Андреевна, инженер 2 категории ХНУРЭ. Научные интересы: обработка и сжатие видеоданных. Адрес: Украина, Харьков, пр. Ленина 14, тел. (057) 702-14-29.

Бекиров Али Энверович, соискатель Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: обработка информации в инфокоммуникационных системах. Адрес: Украина, 61166, Харьков, ул. Сумская, 77/79, тел. (057) 704-96-53.



ПРИМЕНЕНИЕ ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ К РЕШЕНИЮ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ С ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

КОЛОСОВА С.В., СИДОРОВ М.В.

Рассматривается задача Дирихле для эллиптического уравнения с экспоненциальной нелинейностью. С помощью функции Грина и квазифункции Грина эта задача заменяется эквивалентными интегральными уравнениями, для которых предлагаются и обосновываются численные методы.

1. Постановка задачи

В современной науке наблюдается большой интерес к процессам, происходящим в нелинейных средах. Математическими моделями таких процессов обычно являются нелинейные краевые задачи математической физики. Для их конструктивного решения необходимо построение численных методов.

Целью работы является рассмотрение некоторых подходов к построению последовательных приближений к положительному решению краевой задачи вида

$$-\Delta u = e^{-u} \quad \text{в } \Omega, \quad (1)$$

$$u|_{\partial\Omega} = 0. \quad (2)$$

Задача (1), (2) возникает, например, при математическом моделировании течения проводящей среды в цилиндр с непроницаемыми стенками [1] и математическом моделировании теплового самовоспламенения химически активной смеси газов в сосуде [7].

2. Построение двусторонних приближений

Известно [2], что задача (1), (2) в классе непрерывных функций эквивалентна интегральному уравнению

$$u(x) = \int_{\Omega} G(x, s) e^{-u(s)} ds, \quad (3)$$

где $G(x, s)$ – функция Грина оператора Лапласа $-\Delta$ для первой краевой задачи в области Ω , $x = (x_1, \dots, x_n)$, $s = (s_1, \dots, s_n)$.

На конусе K неотрицательных в $C(\Omega)$ функций введем рассмотрение нелинейное операторное уравнение $u = Tu$, где

$$Tu = \int_{\Omega} G(x, s) e^{-u(s)} ds.$$

Рассмотрим некоторые свойства оператора T :

– оператор T антитонный на конусе K , т.е. для всех $u, v \in K$, таких, что $u \leq v$, выполняется $Tu \geq Tv$. Сопутствующим [4] оператору T является оператор

$$\hat{T}(v, w) = \int_{\Omega} G(x, s) e^{-w(s)} ds;$$

– существует инвариантный для оператора T конусный отрезок $\langle v_0, u_0 \rangle$ такой, что

$$T \langle v_0, u_0 \rangle \subset \langle v_0, u_0 \rangle,$$

здесь $v_0(x) \equiv 0$, $u_0(x) = \int_{\Omega} G(x, s) ds$.

Конусный отрезок $\langle v_0, u_0 \rangle$ является также сильно инвариантным, так как выполняются неравенства

$$\hat{T}(v_0, u_0) \geq v_0, \quad \hat{T}(u_0, v_0) \leq u_0;$$

– оператор T вполне непрерывен на K [4], следовательно, конус K является нормальным;

– оператор T псевдогогнутый [4] на K , т.е. существуют положительные числа α, β , такие, что для всех $v, w \in K$ ($v, w \neq 0$)

$$\alpha u_0 \leq \hat{T}(v, w) \leq \beta u_0 \quad (4)$$

и для всех $v, w \in K(u_0)$ и любого $\tau \in (0; 1)$ выполняется неравенство

$$\hat{T}\left(\tau v, \frac{1}{\tau} w\right) > \tau \hat{T}(v, w). \quad (5)$$

Имеет место признак псевдогогнутости [4]: для всех $v, w \in K$ ($v, w \neq 0$)

$$\Phi(v, w) = \hat{T}(v, w) - \hat{T}'_v(v, w)v + \hat{T}'_w(v, w)w \geq 0. \quad (6)$$

Здесь $\hat{T}'_v(v, w)$, $\hat{T}'_w(v, w)$ – производные Фреше.

В нашем случае (6) принимает вид:

$$\Phi(v, w)h(x) = [1 - w(x)] \int_{\Omega} G(x, s) e^{-w(s)} h(s) ds.$$

При условии $\|u_0(x)\|_{C(\Omega)} = \left\| \int_{\Omega} G(x, s) ds \right\|_{C(\Omega)} \leq 1$, чего

можно всегда достичь, применив к области Ω преобразование сжатия, имеем $1 - w(x) \geq 0$, так как $w(x) \in \langle 0, u_0 \rangle$, и, следовательно, условие (6) выполняется;

– оператор T u_0 -псевдогонутый на $K(u_0)$. следовательно [4], для всех $v, w \in K(u_0)$ и любого $\tau \in (0; 1)$ существует $\eta(v, w, \tau) > 0$ такая, что

$$\hat{T}\left(\tau v, \frac{1}{\tau} w\right) \geq [1 + \eta(v, w, \tau)] \tau \hat{T}(v, w). \quad (7)$$

Здесь и ранее $K(u_0)$ означат множество u_0 -ограниченных элементов $u \in K$, т.е. таких элементов $u \in K$, для которых $a(u)u_0 \leq u \leq b(u)u_0$, $a, b > 0$.

Используя (4) и (5), приходим к выводу, что в нашем случае неравенство (7) принимает вид

$$\int_{\Omega} G(x, s) e^{-\frac{w(s)}{\tau}} ds \geq (1 + \eta) \tau \int_{\Omega} G(x, s) e^{-w(s)} ds,$$

где $\eta(v, w, \tau) = \frac{\alpha}{\tau\beta}$, т.е. оператор T является u_0 -псевдогонутым.

Для уравнения (3) с антитонным оператором T строим итерационный процесс по схеме

$$u^{(k+1)}(x) = \int_{\Omega} G(x, s) e^{-u^{(k)}(s)} ds, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

Взяв в качестве начального приближения $u^{(0)}(x) = 0$, получим

$$u^{(1)}(x) = \int_{\Omega} G(x, s) ds = u_0(x),$$

причем $u^{(0)} \leq u^{(1)} = u_0$.

Поскольку оператор T антитонный, то получим $u^{(2)} = Tu^{(1)} \leq u^{(1)} = Tu^{(0)}$, т.е. $u^{(2)} \leq u^{(1)}$. Таким образом, $u^{(0)} \leq u^{(2)} \leq u^{(1)}$. Снова действуя оператором T , получим $u^{(0)} \leq u^{(2)} \leq u^{(3)} \leq u^{(1)}$. Продолжая этот процесс, получим

$$u^{(0)} \leq u^{(2)} \leq \dots \leq u^{(2k)} \leq \dots \leq u^* \leq \dots \leq u^{(2k+1)} \leq \dots \leq u^{(3)} \leq u^{(1)},$$

где $u^* \in v_0$, $u_0 >$ – точное решение задачи (1), (2).

Итак, имеет место следующая теорема.

Теорема. Задача (1), (2) в $C(\Omega)$ имеет единственное положительное решение, которое можно построить по схеме (8) с двусторонними приближениями, равномерно сходящимися к решению.

3. Метод квазифункций Грина

Знание функции Грина позволяет от нелинейной краевой задачи (1), (2) перейти к эквивалентному интегральному уравнению (3). Однако построение функ-

ции Грина в замкнутом виде возможно лишь для некоторых конкретных достаточно простых областей. Нами предлагается приближенный метод решения задачи (1), (2), основанный на использовании квазифункций Грина, которая строится с помощью конструктивного аппарата теории R -функций.

Пусть $\omega(x) = 0$ – нормализованное до первого порядка уравнение границы $\partial\Omega$ области Ω , т.е. функция $\omega(x)$ удовлетворяет следующим условиям:

а) $\omega(x) > 0$ в Ω ;

б) $\omega(x) = 0$ на $\partial\Omega$;

в) $\frac{\partial\omega}{\partial n} = 1$ на $\partial\Omega$, где n – внутренняя к $\partial\Omega$ нормаль.

Если граница $\partial\Omega$ состоит из конечного числа кусочно-гладких кривых (без точек возврата), каждая из которых допускает аналитическое задание с помощью элементарной функции, то такая $\omega(x)$ может быть построена практически для любой Ω методом R -функций в виде элементарной функции [6].

Следуя [6], нами доказано, что решение задачи (1), (2), принадлежащее $\dot{W}_2^1(\Omega)$, также является решением нелинейного интегрального уравнения

$$u(x) = \int_{\Omega} G_{\text{кв.}}(x, \xi) e^{-u(\xi)} d\xi + \int_{\Omega} u(\xi) K(x, \xi) d\xi, \quad (9)$$

где

$$G_{\text{кв.}}(x, \xi) = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \frac{1}{r} - q(x, \xi) \right],$$

$$q(x, \xi) = -\frac{1}{2} \ln \left[r^2 + 4\omega(x)\omega(\xi) \right],$$

$$r = |x - \xi|, \quad K(x, \xi) = -\frac{1}{2\pi} \Delta_{\xi} q(x, \xi).$$

Применяя к интегральному уравнению (9) метод последовательных приближений, сводим его к последовательности линейных интегральных уравнений

$$u^{(k)}(x) - \int_{\Omega} u^{(k)}(\xi) K(x, \xi) d\xi = \int_{\Omega} G_{\text{кв.}}(x, \xi) e^{-u^{(k-1)}(\xi)} d\xi, \quad (10)$$

$k = 2, 3, \dots$, где положили $u^{(1)}(x) \equiv 0$.

Приближенное решение уравнения (10) на каждом шаге итерационного процесса предлагается находить методом Бубнова-Галеркина [3], что позволяет получить результат в аналитическом виде.

Приближенное решение каждого из уравнений (10) ищем в виде

$$u_n^{(k)}(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^n c_j^{(k)} \varphi_j(\mathbf{x}),$$

что приводит к следующей системе линейных алгебраических уравнений относительно $c_j^{(k)}$, $j=1, 2, \dots, n$, $k=2, 3, \dots$:

$$\sum_{i=1}^n c_j^{(2)} \left[\int_{\Omega} \varphi_i(\mathbf{x}) \varphi_j(\mathbf{x}) d\mathbf{x} - \iint_{\Omega \Omega} K(\mathbf{x}, \xi) \varphi_j(\xi) \varphi_i(\mathbf{x}) d\xi d\mathbf{x} \right] = \int_{\Omega \Omega} G_{KB}(\mathbf{x}, \xi) \varphi_i(\mathbf{x}) d\xi d\mathbf{x}, \quad i=1, 2, \dots, n;$$

$$\sum_{i=1}^n c_j^{(k)} \left[\int_{\Omega} \varphi_i(\mathbf{x}) \varphi_j(\mathbf{x}) d\mathbf{x} - \iint_{\Omega \Omega} K(\mathbf{x}, \xi) \varphi_j(\xi) \varphi_i(\mathbf{x}) d\xi d\mathbf{x} \right] = \int_{\Omega \Omega} G_{KB}(\mathbf{x}, \xi) e^{-u_n^{(k-1)}(\xi)} \varphi_i(\mathbf{x}) d\xi d\mathbf{x},$$

$$i=1, 2, \dots, n, \quad k=3, 4, \dots,$$

где $\{\varphi_i(\mathbf{x})\}$ – координатная последовательность.

4. Результаты вычислительного эксперимента

Вычислительный эксперимент в задаче (1), (2) был проведен для двух областей: круга радиуса R и прямоугольника со сторонами a и b .

Для случая, когда область Ω представляет собой круг радиуса R , функция Грина и квазифункция Грина задачи (1), (2) совпадают. Кроме того, для $R=1$ известно [5] точное решение задачи из $C(\Omega)$:

$$u^*(\mathbf{x}) = \ln(8k) - \ln(1 - k\rho^2)^2,$$

где $\rho = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$, $k = 5 - 2\sqrt{6}$.

В таблице 1 приведены значения $u^{(2)}(\mathbf{x})$, $u^{(3)}(\mathbf{x})$ и $u^*(\mathbf{x})$ на луче $\varphi=0$ при различных значениях ρ (ρ , φ – полярные координаты точки $\mathbf{x}=(x_1, x_2)$).

Как видно из табл. 1, точное решение $u^*(\mathbf{x})$ задачи (1), (2) на луче $\varphi=0$ заключено в «вилку», образованную функциями $u^{(2)}(\mathbf{x})$ и $u^{(3)}(\mathbf{x})$. Норма разности между приближениями $u^{(2)}(\mathbf{x})$ и $u^{(3)}(\mathbf{x})$ составила

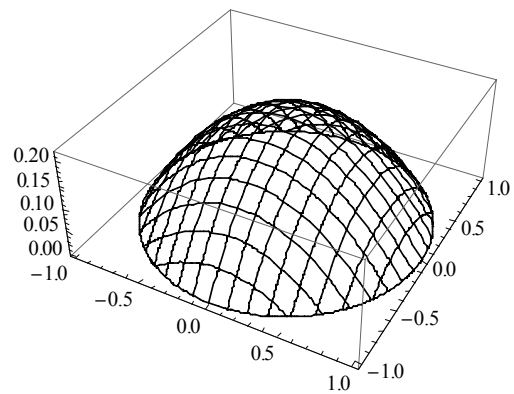
$$\|u^{(2)}(\mathbf{x}) - u^{(3)}(\mathbf{x})\|_{C(\Omega)} = 0,62 \cdot 10^{-2}.$$

Таблица 1

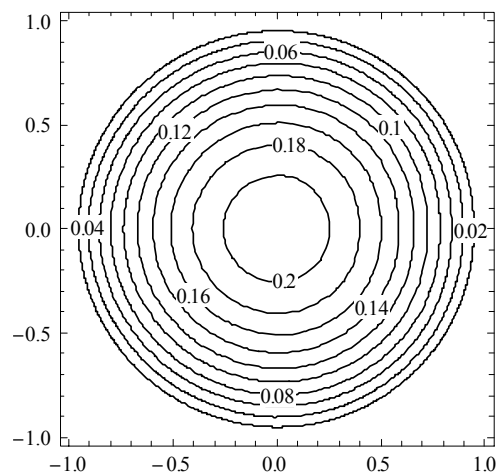
ρ	0	0,1	0,2	0,3	0,4
$u^{(3)}$	0,21392	0,21181	0,20570	0,19561	0,18121
u^*	0,21299	0,21097	0,20489	0,19472	0,18040
$u^{(2)}$	0,20777	0,20574	0,19988	0,19019	0,17633

ρ	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$u^{(3)}$	0,16231	0,13956	0,11200	0,07961	0,04239
u^*	0,16183	0,13890	0,11146	0,07931	0,04225
$u^{(2)}$	0,15812	0,13614	0,10942	0,07790	0,04156

На рис. 1 приведены поверхность (а) и линии уровня (б) приближения $u^{(3)}(\mathbf{x})$.



а



б

Рис. 1

Для случая, когда область Ω представляет собой прямоугольник со сторонами a и b , функция Грина не совпадает с квазифункцией Грина и точное решение задачи (1), (2) неизвестно.

Вычисления были проведены для $a=b=1$. В табл. 2 приведены значения $u^{(2)}(\mathbf{x})$ и $u^{(3)}(\mathbf{x})$, построенные по схеме (4), при $x_2 = \frac{1}{2}$ и различных x_1 . Норма разности между приближениями $u^{(2)}(\mathbf{x})$ и $u^{(3)}(\mathbf{x})$ составила

$$\|u^{(2)}(\mathbf{x}) - u^{(3)}(\mathbf{x})\|_{C(\Omega)} = 0,13 \cdot 10^{-3}.$$

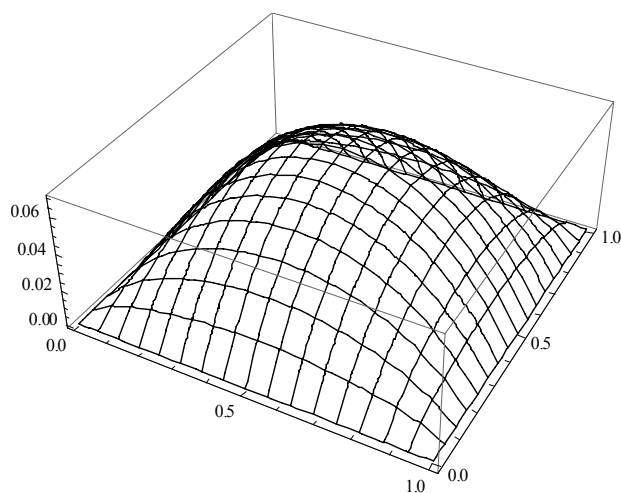
На рис. 2 приведены поверхность (а) и линии уровня (б) приближения $u_{21}^{(4)}(\mathbf{x})$.

Как видно, полученные обоими методами приближенные решения хорошо согласуются.

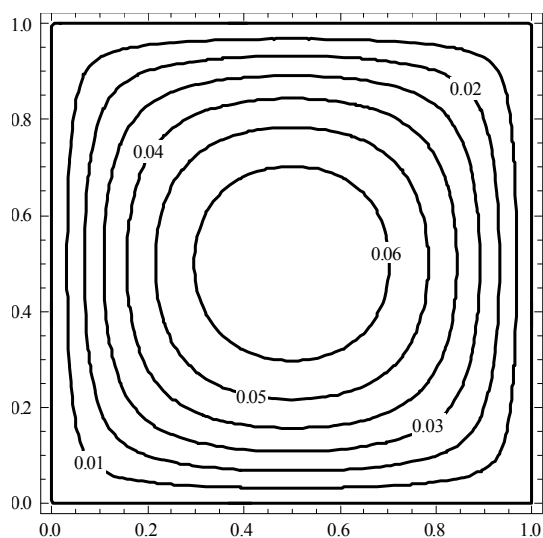
Таблица 2

x_1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$u^{(3)}$	0,02800	0,04738	0,06043	0,06756	0,07004
$u^{(2)}$	0,02797	0,04731	0,06033	0,06744	0,06991

x_1	0,6	0,7	0,8	0,9
$u^{(3)}$	0,06756	0,06043	0,04738	0,02800
$u^{(2)}$	0,06744	0,06033	0,04731	0,02797



а



б

Рис. 2

5. Заключение

В работе исследована возможность построения приближенных методов решения задачи (1), (2). Один из методов основан на использовании точной функции Грина, что позволяет получить двусторонние приближения к решению рассматриваемой задачи. Другой метод применяет квазифункцию Грина, которая строится, используя конструктивный аппарат теории R -функций, что позволяет приближенно решить задачу (1), (2) в областях практически произвольной геометрии, для которых функция Грина либо неизвестна, либо сложна в построении. Предлагаемые методы могут быть использованы при решении прикладных задач, математическими моделями которых служат краевые задачи для нелинейных эллиптических уравнений.

Литература: 1. Беллман Р., Калаба Р. Квазилинеаризация и нелинейные краевые задачи. М.: Мир, 1968. 183 с. 2. Красносельский М.А. Положительные решения операторных уравнений. М.: Физматгиз, 1962. 394 с. 3. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. М.: Наука, 1970. 512 с. 4. Опейцев В.И. Обобщение теории монотонных и вогнутых операторов // Труды Моск. матем. общества. 1978. Т. 36. С. 237–273. 5. Полянин А.Д., Зайцев В.Ф. Справочник нелинейные уравнения математической физики: точные решения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 432 с. 6. Рвачев В.Л. Теория R -функций и некоторые её приложения. К.: Наук. думка, 1982. 552 с. 7. Франк-Каменецкий Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Интеллект, 2008. 408 с.

Поступила в редколлегию 06.09.2013

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Колосов А.И.

Колосова Светлана Васильевна, канд. физ.-мат. наук, проф. каф. прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование, численные методы математической физики. Увлечения и хобби: театр, искусство и литература. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 7021436.

Сидоров Максим Викторович, канд. физ.-мат. наук, доц. каф. прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование, численные методы, математическая физика, теория R -функций и её приложения, стохастический анализ и его приложения. Увлечения и хобби: всемирная история, история искусств. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 7021436.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБУЧЕНИЯ РАБОТЕ С СИСТЕМОЙ КОНТРОЛЯ ВЕРСИЙ «GIT»

ВОРОНИН А.А., ГАРЯЧЕВСКАЯ И.В.

Рассматриваются возможные решения задачи обучения сотрудников компьютерной фирмы работе с системой контроля версий Git путем автоматизации данного процесса и внедрения специализированных обучающих систем.

Введение

Обучение персонала компьютерной фирмы – задача, требующая решения. Область IT постоянно эволюционирует, требует новых знаний для работы с новыми технологиями. В большинстве проектов число разработчиков достаточно большое, при совместной работе команды не исключены ошибки. Поэтому необходимо использовать средства, позволяющие отслеживать все манипуляции с файлами проекта и предоставлять возможность вернуть проект до определенного состояния. Git – система контроля версий, позволяющая отслеживать все изменения определенного файла или файлов проекта. Обучение работе с системой Git – сложный и долгий процесс. Внедрение автоматизированной системы позволит сделать процесс обучения более понятным с гарантией правильности обучения и с пошаговой инструкцией.

Анализ предметной области

Наиболее эффективный способ, при индивидуальном обучении новым технологиям, это использование автоматизированных обучающих систем.

В настоящее время применяется множество терминов, обозначающих автоматизированную обучающую систему, которые, по сути, являются аналогичными. Наиболее распространенные из них:

- система дистанционного обучения (СДО);
- автоматизированная система дистанционного обучения (АСДО);
- автоматизированная система обучения (АСО);
- обучающая программа;
- обучающая система и ряд других, менее распространенных терминов из области электронного обучения.

Независимо от используемой терминологии обучающие системы можно классифицировать на замкнутые и разомкнутые (рис. 1).

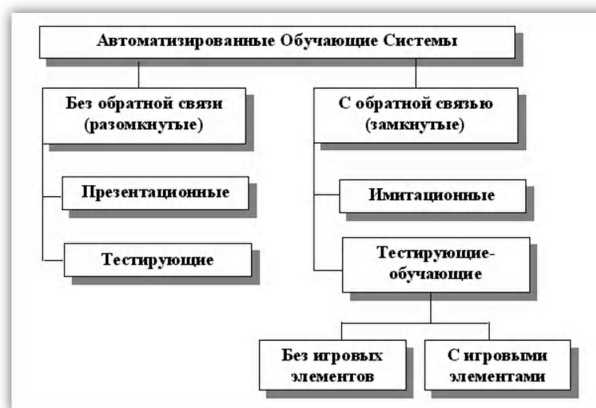


Рис. 1. Классификация обучающих систем

Из существующих обучающих систем наиболее полная информация о системе контроля версий Git представлена на официальном сайте: <http://githowto.com/> (рис.2).

Для выработки навыков работы с Git необходимо изучить материал, состоящий из 51 урока.

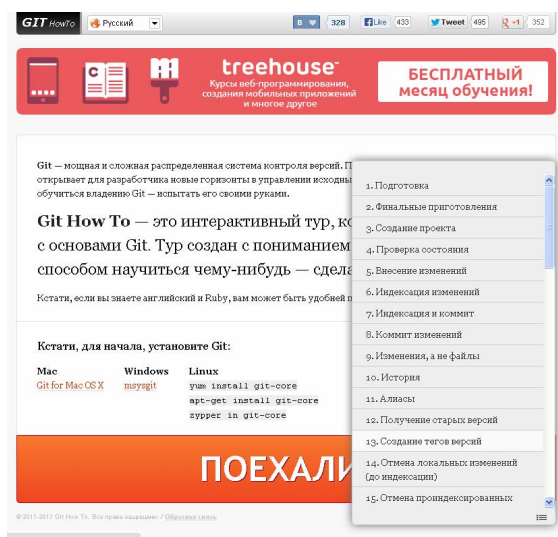


Рис. 2. Официальная система обучения работе с Git

При использовании данной обучающей системы были выявлены существенные недостатки:

1. Возможность проходить задания в любом порядке, при этом пропуская некоторые из них.
2. Отсутствие подтверждения о правильности выполненного задания.
3. Редактирование существующих заданий и добавление новых влечет за собой многочисленные манипуляции и изменение на уровне верстки сайта.

Проведенный анализ предметной области позволил сделать вывод, что для изучения системы контроля версий Git существующие системы обучения не дают возможности накопить необходимый объем знаний и навыков по работе с данной системой контроля версий.

Разработанная автоматизированная обучающая система для работы с Git

В разработанной автоматизированной обучающей системе реализовано взаимодействие основных ее компонентов (рис.3).

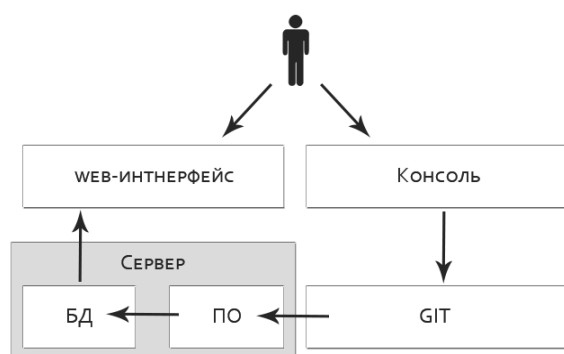


Рис 3. Компоненты системы

Веб-ориентированный интерфейс обучающей системы отображает всю необходимую информацию на web-странице и связан с базой данных, расположенной на сервере. Также с сервером и базой данных связана система Git. При прохождении пользователем учебного курса в базе данных фиксируется попытка решения. Фрагмент базы данных представлен на рис.4.

В случае правильного решения меняется статус задания, иначе, для текущего задания счетчик попыток увеличивается на единицу. Данные о попытках прохождения задания выводятся в отчетах по успеваемости пользователя и в статистике по заданиям.

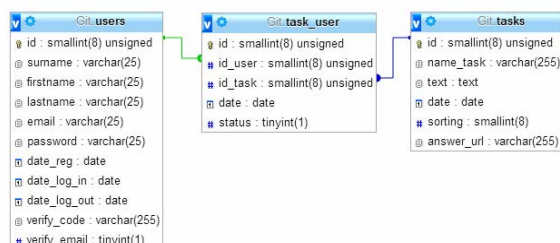


Рис. 4. Фрагмент базы данных

Пользователь в процессе обучения взаимодействует с двумя компонентами системы. Непосредственно задание и его описание отображается на web-странице обучающей системы, в качестве второго компонента системы выступает консоль, через которую пользователь выполняет задания. Команды, набранные в консоли, обрабатываются системой контроля версий Git. Процесс выполнения продолжается до тех пор, пока пользователь не будет уверен, что он выполнил задание корректно. При выполнении команды Git Push происходит отправка на сервер пользовательского решения данного задания.

На сервере находится:

– база данных,

– программное обеспечение автоматизированной обучающей системы,

– файлы с эталонными решениями заданий обучающего курса.

Присланное решение задания системой Git сравнивается с эталонным заданием, в случае совпадения решения задание считается пройденным. В базе данных обновляются соответствующие поля и на странице пользователя появляется отметка о прохождении задания и открывается доступ к следующему заданию. В случае неправильного решения данного задания возрастает число попыток прохождения и пользователю будет необходимо выполнить задание еще раз.

Число попыток прохождения заданий отображается у пользователя на странице заданий и будет использоваться при работе модуля «статистика».

Ниже представлен пользовательский интерфейс обучающей системы (рис. 5 и 6).

GIT training WORKSHEETS			
		Александр Воронин	100%
		заданий	20
		выполнено	4
№	Название	Попыток	Статус
1	Индексация и коммит <small>Отдельный шаг индексации в git позволяет вам...</small>	7	✓ завершено
2	Коммит изменений <small>Дайте сделав коммит того, что мы проиндексировали...</small>	2	✓ завершено
3	Изменения, а не файлы <small>Большинство систем версионного контроля работают с...</small>	1	✓ завершено
4	История <small>Получение списка произведенных изменений...</small>	34	✗ не завершено
5	Получение старых версий <small>Команда checkout скопирует любой снимок из репозитория в рабочий каталог...</small>		✗ не достигнуто

Рис.5. Интерфейс страницы заданий

На рис.5 представлена страница заданий. В списке заданий отображаются не все задания учебного курса. На странице пользователю видны все пройденные им задания на текущий момент времени, одно задание, находящееся в данный момент времени в процессе решения и одно задание, недоступное для прохождения до момента получения подтверждения о прохождении текущего задания. Остальные задания будут недоступными, не будут отображаться в списке, что позволяет, проходя обучающий курс, избежать перескакивания по заданиям. Общее количество заданий обучающей системы и число пройденных заданий отображается в верхнем правом углу станицы.

На рис.6 показана страница задания. Она представляет собой детальное описание задания, образцы команд работы с Git, переключатели заданий (следующее и предыдущее), а также отметка о прохождении задания.

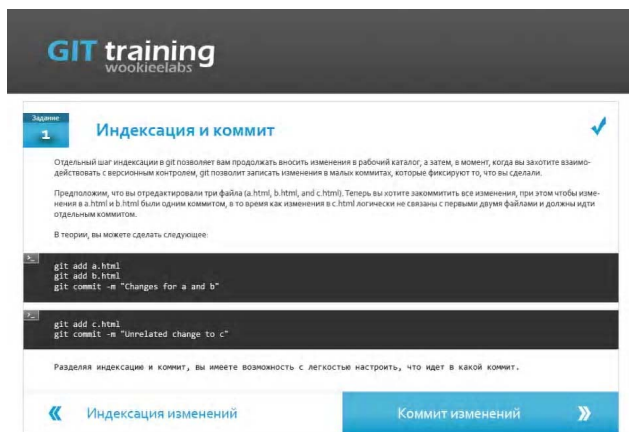


Рис. 6. Скриншоты пользовательского интерфейса обучающей системы (страница задания)

На рис. 7, 8 представлены скриншоты режима работы администратора. В системе реализованы следующие функции:

- добавление нового пользователя (ученика),
- просмотр и редактирование информации о зарегистрированных пользователях,
- статистика прохождения курса по всей группе и по отдельному пользователю,
- добавление нового задания,
- получение статистики по заданиям,
- просмотр, удаление или редактирование имеющихся заданий.

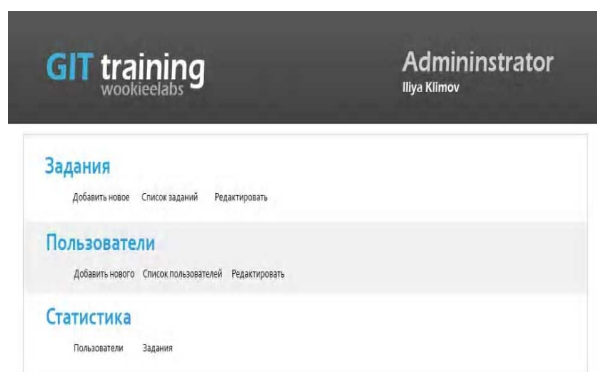


Рис. 7. Скриншот режима администратора (стартовая страница)

На рис. 8 представлен скриншот страницы Статистика. На данном примере отображается статистика по трем ученикам, проходящим в данное время обучение. На графике по оси x расположены задания, а по оси y – число попыток прохождения каждого задания. Для каждого пользователя задан свой цвет. При необходимости можно перейти к индивидуальному графику по конкретному пользователю (ученику). Кроме этого, можно менять значения, расположенные на оси y , и анализировать статистику по времени, которое было затрачено пользователем на прохождение заданий.



Рис. 8. Скриншот режима администратора (страница статистики)

Администратор может выводить статистику по заданиям, что позволит проанализировать уровень сложности заданий и выявлять слишком сложные или некорректно сформулированные задания, вызывающие сложность выполнения, а также слишком простые задания.

Алгоритм работы модуля статистика следующий:

1. Получаем список пользователей, список заданий и результаты выполнения заданий в виде числа попыток.
2. Высчитываем общую сумму числа попыток выполнения всех заданий каждым пользователем по формуле:

$$R_j = \sum_{i=0}^n p_i,$$

где R_j – сумма попыток выполнения заданий для каждого j пользователя; p_i – количество попыток выполнения i задания; $0 \leq i \leq n$, n – общее количество заданий в обучающей системе.

3. Производим упорядочивание полученных результатов по убыванию.

4. Вычисление коэффициента успешности прохождения заданий осуществляем по следующим шагам:

- находим max и min значения в полученной выборке,
- значение max увеличиваем на единицу и приравниваем к 0,
- значения min приравниваем к 1,

– все остальные имеющиеся значения переводим в диапазон от 0 до 1, тем самым получаем значения коэффициента успешности k .

5. Определяем сложность задания по формуле:

$$S_i = \sum_{j=1}^m p_i \times k_j,$$

где S_i – сложность i задания; p_i – количество попыток прохождения задания j пользователем; m – общее число пользователей.

6. Определяем допустимые границы и задания, значения которых не попадают в эти границы.

Замена или редактирование подобных заданий позволит улучшить обучающую систему.

Заключение

Рассмотрены вопросы построения обучающей системы для получения практических навыков при работе с системой контроля версий Git. Цель данной разработке обусловлена отсутствием простой, бесплатной и удобной системы обучения работе с Git. В разработанной системе реализован удобный пользовательский интерфейс, учтены недостатки существующих систем и введен жесткий алгоритм пошагового выполнения заданий без права менять порядок выполнения заданий, добавлена функция подтверждения правильности выполнения задания. Для администратора реализованы возможности управления пользователями и заданиями, а также модуль Статистики.

Литература: 1. Мельников А.В., Цытович П.Л. Принципы построения обучающих систем и их классификация. 2. Новое поколение систем контроля версий [Электронный ресурс] Доступ к ст.: http://www.techinfo.net.ru/docs/Version_Control_Systems.html. 3. Мельников А.В., Цытович П.Л. Модель взаимодействия виртуальных объектов для имитации работы в сети Internet

Поступила в редколлегию 20.08.2013

Рецензент: д-р.техн.наук, проф. Путятин В.П.

Воронин Александр Александрович, студент факультета высоких технологий. Международный Соломонов университет, Восточноукраинский филиал. Адрес: Украина, 61058, Харьков, ул. Гражданская, 22/26, тел (057) 771-02-53), e-mail: info@msu-kharkov.edu.ua, факс (057) 771-02-54.

Гарячевская Ирина Васильевна, канд. техн. наук, зав. каф. ПЗАС Международного Соломонова университета, Восточноукраинский филиал. Адрес: Украина, 61058, Харьков, ул. Гражданская, 22/26, тел (057) 771-02-53) e-mail: info@msu-kharkov.edu.ua, факс (057) 771-02-54.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА



УДК681.326:519.713

КУБИТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АНАЛИЗА И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

*ХАХАНОВ В.И., BAGHDADI AMMAR AWNI
ABBAS, ЧУМАЧЕНКО С.В., ШКИЛЬ А.С.,
МЕЛИКЯН ВАЗГЕН*

Предлагаются теория и примеры реализации кубитных моделей, методов и алгоритмов для повышения быстродействия существующих программных и аппаратных средств анализа цифровых вычислительных устройств за счет увеличения размерности структур данных и памяти для одновременного хранения обрабатываемых состояний. Описываются результаты исследований, касающихся моделей и методов диагностирования цифровых систем, моделирования исправного поведения, восстановления работоспособности отказавших примитивов.

1. Введение

Эволюция киберпространства планеты условно делится на следующие периоды: 1) 1980-е годы – формирование парка персональных компьютеров; 2) 1990-е годы – внедрение Интернет-технологий в производственные процессы и быт человека; 3) 2000-е годы – повышение качества жизни за счет внедрения мобильных устройств и облачных сервисов; 4) 2010-е годы – создание цифровой инфраструктуры мониторинга, управления и взаимодействия между собой стационарных и движущихся объектов (воздушный, морской, наземный транспорт и роботы); 5) 2015-е годы – создание глобальной цифровой инфраструктуры киберпространства, где все процессы, явления идентифицируются во времени и в трехмерном пространстве и становятся интеллектуальными. В связи с необходимостью развития параллельных вычислений неупорядоченных данных в последние годы становятся все более значимыми для анализа эволюционирующего кибернетического пространства создания облачных Интернет сервисов, благодаря их позитивной альтернативности существующим затратным по времени классическим моделям последовательной обработки теоретико-множественных структур, за счет существенного расширения памяти [1]. Однако такая плата в настоящее время вполне допустима, поскольку рынок нано-электронных технологий предоставляет сегодня разработчикам цифровых систем до 1 миллиарда вентилях на кристалле размерностью 2x2 см при толщине пластины в 5 микрон. При этом

современные технологии допускают создание пакета или «сэндвича», содержащего до 7 кристаллов. Практически «беспроводное» соединение таких пластин основывается на технологической возможности сверления порядка 10 тысяч сквозных отверстий (vias) на 1 квадратном сантиметре. Кроме того, появление трехмерных FinFETs транзисторов и основанных на них 3D-технологий реализации объемных цифровых систем предоставляют новые возможности для создания более быстродействующих за счет уменьшения задержек параллельных вычислительных устройств [2-7]. Поэтому можно и нужно использовать «жадные» к аппаратуре модели и методы для создания быстродействующих средств параллельного решения практических задач. Имея в виду дискретность и многозначность алфавитов описания информационных процессов, свойство параллелизма (одновременности процессов), заложенное в квантовых вычислениях, является востребованным при создании эффективных и интеллектуальных «движков» для киберпространства, облачных структур и сервисов Интернета; повышения надежности цифровых устройств; тестирования и моделирования дискретных систем на кристаллах. Здесь не рассматриваются физические основы квантовой механики, касающиеся недетерминированного взаимодействия атомных частиц, но используется понятие кубитной структуры как векторной формы совместного или одновременного задания булеана состояний в конечной и дискретной области киберпространства, ориентированного на параллелизм и суперпозицию обработки предлагаемых кубитных моделей и методов.

Квантовые эмуляторы на классических компьютерах достаточно эффективно применяются для решения оптимизационных задач, связанных с полным перебором вариантов решений на основе использования теории множеств [1,8]. Особенность в том, что множество элементов в компьютере всегда является упорядоченным, поскольку каждый бит, байт или другой компонент имеет свой адрес. Поэтому все теоретико-множественные операции, так или иначе, сводятся к полному перебору адресов примитивных элементов. Адресный порядок структур данных хорош для задач, где компоненты моделей можно строго ранжировать, что дает возможность выполнять их анализ за один проход или одну итерацию. Там, где нет порядка в структуре, например, множество всех подмножеств, классическая модель памяти и вычислительных процессов наносит вред времени анализа ассоциации равных по рангу примитивов, или, в лучшем случае, обработка ассоциативных групп является неэффективной. Что можно предложить для неупорядоченных данных вместо строгого порядка? Процессор, где элементарной ячейкой служит образ или шаблон универсума из n примитивов, который генерирует $Q=2^n$ всех возможных состояний такой ячейки в виде булеана или множества всех подмножеств. Прямое решение, ориентированное на создание такой ячейки, использует унитарное позиционное кодирование состо-

яний примитивов, которое с помощью суперпозиции последних образует универсум примитивов, формирующий в пределе булеан или множество всех подмножеств [8,9].

n-Кубит есть векторная форма унитарного кодирования универсума из n примитивов для задания булеана

состояний 2^{2^n} с помощью 2^n двоичных переменных. Например, если $n=2$, то 2-кубит задает 16 состояний с помощью 4-х переменных. Если $n=1$, то кубит задает 4 состояния на универсуме из двух примитивов с помощью 2-х двоичных переменных (00,01,10,11) [1]. При этом допускается суперпозиция (одновременное существование) в векторе 2^n состояний. Кубит (n-кубит) дает возможность использовать логические операции вместо теоретико-множественных для существенного ускорения процессов синтеза и анализа дискретных систем. Далее кубит отождествляется с n-кубитом или вектором, если это не мешает пониманию излагаемого материала. Поскольку квантовые вычисления связаны с анализом кубитных структур данных, то далее частично эксплуатируется определение «квантовый» для идентификации технологий, использующих два свойства квантовой механики: параллелизм обработки и суперпозицию состояний.

2. Кубитный метод диагностирования цифровых систем

Предлагается метод диагностирования функциональных нарушений и константных неисправностей в программных или аппаратных блоках, которые используют «кубитные» или многозначные структуры данных для задания диагностической информации, что дает возможность существенно уменьшить вычислительную сложность процессов моделирования и диагностирования за счет введения параллельных логических операций над матричными данными. Представлен кубитный метод исправного моделирования цифровых устройств с восстановлением работоспособности компонентов цифровой системы в режиме online, который имеет существенно более высокое быстродействие за счет адресной реализации процедуры обработки функциональных примитивов, заданных кубитными векторами состояний выходов.

Модель объекта диагностирования представлена в форме графа цифровой системы, которая имеет функциональные элементы, соединенные линиями связей. Среди них имеются ассерции – точки наблюдения или мониторинга, необходимые для верификации, тестирования и диагностирования неисправностей [2]. Диагностическая информация представлена компонентами: 1) Тест проверки или диагностирования неисправностей заданного класса, в данном случае рассматриваются одиночные константные дефекты линий схемы. 2) Таблица неисправностей [6], строки которой задают векторы проверяемых на каждом тестовом наборе дефектов, привязанных к линиям схемы. 3) Матрица достижимостей, которая определяет достижимость каждой ассерционной точки со

стороны множества предшествующих линий [8]. 4) Матрица состояния ассерционного механизма, или матрица экспериментальной проверки, задающая состояние каждой ассерции на тестовых наборах путем сравнения эталонной реакции в данной точке с реальным сигналом в процессе выполнения диагностического эксперимента [2,7].

Базовая модель диагностирования цифрового изделия, дискретного процесса или явления представлена компонентами, которые создают 4 измерения в пространстве признаков:

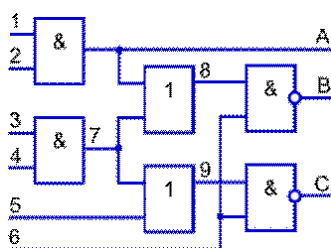
$$\begin{cases} D_b = \langle S, A, F, T \rangle \\ D = \{ \langle S, A \rangle, \langle F, T \rangle \}; \\ V_b = (|S| \times |A| \times |F| \times |T|); \\ V = (|S| \times |A|) + (|F| \times |T|); \\ V_b \gg V; \\ S^* = f(S, A, T); \\ A^* = g(T, A); \\ F^* = h(S, A, F, T); \end{cases}$$

При этом в модели объем диагностической информации V формируется декартовым произведением (мощностей) четырех компонентов в порядке следования, указанном выше: 1) структура объекта; 2) механизм ассерций или мониторинга; 3) совокупность неисправностей или модулей, подверженных функциональным нарушениям; 4) тестовые наборы или сегменты для диагностирования неисправностей или совокупности упомянутых модулей. Актуально и существенно уменьшить объем диагностической информации можно путем понижения размерности пространства признаков за счет разделения базовой модели на два непересекающихся подмножества $\langle S, A \rangle, \langle F, T \rangle$. В этом случае оценка объема диагностической информации становится не мультипликативной, а аддитивной по отношению к мощности полученных в результате разбиения подмножеств без какого-либо уменьшения глубины диагностирования. Здесь первый компонент модели диагностирования представлен матрицей достижимостей, которая позволяет минимизировать маску возможных дефектов на основе анализа структуры схемы путем сравнения истинных и реальных результатов моделирования выходных сигналов на каждом тестовом наборе или сегменте. Число строк такой матрицы равно количеству наблюдаемых выходов или ассерций.

В процессе выполнения метода диагностирования создается двоичная матрица структурной активизации неисправностей, которая служит маской для существенного уменьшения множества подозреваемых дефектов при совместном анализе таблицы неисправностей. При этом символы одиночных константных дефектов $\{0, 1, X, \emptyset\}$, $X = \{0, 1\}$ в ячейках таблицы неисправностей [6] кодируются соответствующими состояниями кубита (10,01,11,00) многозначного алфавита Кантора $A^k = \{0, 1, X, \emptyset\}$, что дает возможность исклю-

чить из вычислительных процессов теоретико-множественные процедуры, заменив их на векторные логические операции.

Для рассмотрения сущности предлагаемого метода используется фрагмент цифровой схемы, представленной на рис. 1. Здесь имеются три ассерционных точки A, B, C для наблюдения за состоянием всех линий схемы в процессе тестирования (выполнения диагностического эксперимента) путем подачи пяти тестовых воздействий, заданных в таблице неисправностей F(T). Координаты данной таблицы задают проверяемые на тест-векторах неисправности 0 и 1, а также имеются состояния координат: \emptyset (.) – отсутствие проверяемых дефектов и X – проверка на линии константы 0 и 1 одновременно. Правая часть таблицы есть матрица состояний ассерционного механизма в виде результатов сравнения эталонной и реальной реакций цифрового устройства на тестовые наборы. Значение 1 означает несравнение, 0 – совпадение упомянутых реакций.



F(T)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	V _a	V _b	V _c
111101	0	0	0	0	.	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
010101	1	.	1	.	1	.	1	1	1	0	0	0	0	1	1
101001	.	1	.	1	1	.	1	1	1	0	0	0	0	0	0
000011	.	.	.	.	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0
111110	0	0	.	.	.	1	.	.	.	0	0	0	1	1	1

Рис. 1. Фрагмент цифровой схемы и таблица неисправностей

В таблице неисправностей не учитывается структура схемы для повышения глубины диагностирования на основе вычисления реальной матрицы состояний ассерционного механизма, которая совместно с матрицей достижимостей создает структурную маску, минимизирующую множество подозреваемых дефектов.

Для фрагмента цифровой схемы, представленной на рис. 1, матрица достижимостей имеет следующий вид:

S = |S _{ij}|	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C
1	1	1	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.
2	1	1	1	1	.	1	1	1	.	1	.	.
3	.	.	1	1	1	1	1	1	.	1	.	1

Здесь выходы-ассерции A, B, C являются мониторами технического состояния объекта диагностирования. Каждый из них может иметь два значения: $A_{ij} = \{0,1\}$, которые определяют матрицу экспериментальной проверки $A = |A_{ij}|$ путем сравнения эталонных $T = |T_{ij}|$ и

реальных $U = |U_{ij}|$ состояний наблюдаемых или выходных линий: $A_{ij} = T_{ij} \oplus U_{ij}$, которые формируют маску возможных дефектов с помощью следующего

выражения: $S_i = S(T_i) = (\bigvee_{A_{ij}=1} S_{ij}) \wedge (\bigvee_{A_{ij}=0} \overline{S_{ij}})$.

Каждый тест-вектор (-сегмент) активизирует собственную структуру возможных дефектов, которая функционально зависит от маски, ассерций (состояния наблюдаемых выходов) и тестовых наборов: $S = f(S, A, T_i)$. Если предположить, что в матрице $S = |S_{ij}|$ состояния ассерционных выходов на первом тест-векторе равны $A_{1A} = 0; A_{1B} = 1; A_{1C} = 1$, где значение 1 идентифицирует проявление дефекта в устройстве, то маска возможных дефектов, согласно

функционалу $S_1 = S(T_1) = (\bigvee_{A_{1j}=1} S_{1j}) \wedge (\bigvee_{A_{1j}=0} \overline{S_{1j}})$, будет иметь следующий вид:

$$S_1 = S(T_1) = (S_2 \vee S_3) \wedge (\overline{S_1}) = \\ = (111101110010 \vee 0011111101001) \wedge (110000000100) = \\ = (111111111011) \wedge (001111111011) = (001111111011).$$

Полученная маска накладывается на первую строку таблицы неисправностей, что определяет множество подозреваемых дефектов:

$$F_i = T_i \wedge S|_{i=1} \rightarrow F_1 = T_1 \wedge S_1,$$

формирующих ассерционную выходную реакцию $A_{1(A,B,C)} = (011)$ устройства на первый тест-вектор:

Faults	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C
T ₁	0	0	0	0	.	0	0	0	0	1	1	1
S ₁	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
F ₁ = T ₁ ∧ S ₁	.	.	0	0	.	0	0	0	.	1	1	1

В соответствии с предложенной процедурой получения маски одной строки выполняется построение матрицы структурной активизации неисправностей S(T) на основе использования таблицы экспериментальной проверки $A = |A_{ij}|$, задающей состояния ассерционного механизма в процессе выполнения тестирования $S(T) = S \otimes A$:

S = |S _{ij}|	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C
1	1	1	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.
2	1	1	1	1	.	1	1	1	.	1	.	.
3	.	.	1	1	1	1	1	1	.	1	.	1

 \otimes

A = |A _{ij}|	A	B	C
T ₁	1	0	0
T ₂	0	1	1
T ₃	0	0	0
T ₄	0	0	0
T ₅	1	1	1

 $=$

S(T)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C
T ₁	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
T ₂	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
T ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T ₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T ₅	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

В целях формирования структур данных, удобных для компьютерной обработки, необходимо перевести символы таблицы неисправностей в двухразрядные коды в соответствии с правилами \triangleright -кодирования: $\triangleright = \{0=10, 1=01, X=11, \emptyset=00\}$, применение которых к таблице неисправностей $F(T)$ дает следующий результат:

F(T)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C
T1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		
T2	1	.	1	.	1	1	1	1	0	0		
T3	.	1	.	1	1	1	1	1	0	0		
T4	.	.	.	.	0	0	1	1	0	1		
T5	0	0	.	.	1	.	.	.	0	0		

 \triangleright

F(T)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C
T1	10	10	10	10	00	10	10	10	10	01	01	
T2	01	00	01	00	01	00	01	01	01	10	10	
T3	00	01	00	01	01	00	01	01	01	10	10	
T4	00	00	00	00	10	10	01	01	10	01	01	
T5	10	10	00	00	00	01	00	00	00	10	10	

После получения структурной матрицы $S(T)$, предназначенной маскировать реальные дефекты в таблице неисправностей и ее кодированной форме, необходимо выполнить $\#$ -суперпозицию двух матриц: $F(T) = S(T) \# F(T)$, которая сводится к выполнению $\#$ -операции над одноименными координатами $F_{ij} = \bar{F}_j \leftarrow (F_j = 00) \vee (S_{ij} = 0)$, что означает модификацию кодов координат таблицы $F(T)$ при выполнении заданных условий. Иначе, данная операция сводится к инверсии ячеек матрицы кодов неисправностей, маскируемых нулевыми сигналами структурной матрицы активизации, а также всех нулевых кодов таблицы неисправностей. Таблица истинности данной $\#$ -операции в символьном и кодированном виде представлена ниже:

$\# = S_{ij} \setminus F_{ij}$	\emptyset	1	0	X
0	X	0	1	\emptyset
1	X	1	0	X

$\# = S_{ij} \setminus F_{ij}$	00	01	10	11
0	11	10	01	00
1	11	01	10	11

Таблица истинности скорректирована относительно инверсии состояния 00 в 11 при единичном значении сигнала активизации неисправности, потому что такой код (00) означает присутствие в схеме на линии пустого множества проверяемых дефектов, что невозможно. Но код 00 еще блокирует все вычисления конъюнкции по столбцу, превращая результат в 00. Инверсия кода дает возможность не маскировать при логическом умножении действительно присутствующих дефектов, любых знаков. При этом предполагается, что невозможно тест-вектором проверить на одной линии схемы дефекты разных знаков.

Выполнение процедуры суперпозиции структурной матрицы с кодированной таблицей неисправностей $F(T) = S(T) \# F(T)$ дает следующий результат:

S(T)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C
T1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
T2	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1		
T3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
T4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
T5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		

 $\#$

F(T)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C
T1	10	10	10	10	00	10	10	10	10	01	01	
T2	01	00	01	00	01	00	01	01	01	10	10	
T3	00	01	00	01	01	00	01	01	01	10	10	
T4	00	00	00	00	10	10	01	01	10	01	01	
T5	10	10	00	00	00	01	00	00	00	10	10	

F(T)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C
\wedge	10	10	01	01	11	01	01	01	01	10	10	
	10	11	01	11	01	11	01	01	01	10	10	
	11	10	11	10	10	11	10	10	10	01	01	
	11	11	11	11	01	10	10	01	10	01	10	
	10	10	11	11	11	01	11	11	11	10	10	
$F(T) = \bigwedge_{i=1}^n F_i$	10	10	01	00	00	01	00	00	00	10	00	
$F =$	0	0	1	.	.	1	.	.	.	0	.	

На заключительной стадии диагностирования выполняется единственная и векторная операция логического умножения всех строк кодированной модифицированной таблицы истинности $F(T)$:

$$F(T) = \left(\bigvee_{A_i=1} F_i \right) \wedge \left(\bigvee_{A_i=0} \bar{F}_i \right) = \left(\bigwedge_{A_i=1} F_i \right) \wedge \left(\bigvee_{A_i=0} \bar{F}_i \right) = \left(\bigwedge_{A_i=1} F_i \right) \wedge \left(\bigwedge_{A_i=0} \bar{F}_i \right) = \left(\bigwedge_{i=1}^n F_i \right).$$

Это дает возможность точно определить все дефекты, присутствующие в объекте диагностирования, которые представлены в двух нижних строках приведенной выше кодированной таблицы неисправностей $F(T)$:

$$F = \{1^0, 2^0, 3^1, 6^1, A^0\}.$$

Теоретическое доказательство матричного диагностирования одиночных и кратных дефектов представлено в виде двух теорем.

Теорема 1. Одиночные константные дефекты цифровой схемы, заданные кубитами (двухразрядными векторами) на тестовых наборах многозначной таблицы неисправностей, определяются с помощью векторной and-операции, маскируемой по строкам матрицей (вектором) экспериментальной проверки $A < |A_{ij}|$ всех ассерционных точек:

$$F(T) = \left(\bigvee_{A_i=1} F_i \right) \wedge \left(\bigvee_{A_i=0} \bar{F}_i \right) = \left(\bigwedge_{A_i=1} F_i \right) \wedge \left(\bigvee_{A_i=0} \bar{F}_i \right) = \left(\bigwedge_{A_i=1} F_i \right) \wedge \left(\bigwedge_{A_i=0} \bar{F}_i \right) = \left(\bigwedge_{i=1}^n F_i \right).$$

Выражение является верным, потому что: 1) Второй сомножитель – чистая математика – отрицание дизъюнкции есть конъюнкция отрицаний, что означает умножение кодов таблицы с их предварительным отрицанием. 2) Первый сомножитель ориентирован на поиск непротиворечивых дефектов, поэтому он заменяется на $\left(\bigwedge_{A_i=1} F_i \right)$. Действительно, на одной линии

или переменной не могут присутствовать одновременно две противоположных по знаку проверяемых неисправности. Поэтому в базовой формуле дизъюнкция дефектов $\left(\bigvee_{A_i=1} F_i \right)$ в большей степени ориенти-

рована на поиск кратных неисправностей, но не связанных с одной линией. Кратность противоречивых дефектов на одной линии, равно как и инверсия пустого множества неисправностей, теоретически создает условия беспрепятственного умножения других ячеек столбца в целях формирования на каждой линии результата в виде дефекта одного знака или пустого множества неисправностей.

Теорема 2. Кратные константные дефекты цифровой схемы, заданные кубитами на тестовых наборах многозначной таблицы неисправностей, определяются с помощью векторных or- and- операций, маскируемых по строкам вектором экспериментальной проверки $A(T)$ всех ассерционных точек:

$$F(T) = (\bigvee_{A_i=1} F_i) \wedge (\bigvee_{A_i=0} \overline{F_i}) = (\bigvee_{A_i=1} F_i) \wedge (\bigwedge_{A_i=0} \overline{F_i}).$$

Выражение является верным, потому что: 1) Второй сомножитель есть отрицание дизъюнкции или конъюнкция отрицаний, что означает умножение кодов таблицы с их предварительным отрицанием. 2) Первый сомножитель ориентирован на поиск кратных дефектов в предположении, что на одной линии или переменной могут присутствовать одновременно две противоположных по знаку проверяемых неисправности. Данная формула в большей степени ориентирована на поиск кратных дефектов в блоках цифровых систем, не связанных с одной линией. Кратность неисправностей в цифровой системе теоретически создает условия для логического сложения других ячеек столбца в целях формирования результата в виде множества дефектов, формирующих заданный вектор экспериментальной проверки, из которых необходимо вычесть проверяемые на тесте неисправности, которые не влияют на формирование некорректных реакций по выходам.

Интерес представляет поиск кратных дефектов на основе мультипроцессора Хассе [4,5], который ориентирован на решение задачи покрытия путем полного перебора событий, обеспечивающих точное покрытие вектора экспериментальной проверки столбцами таблицы неисправностей: $F(T) = (\bigvee_i F_i) \oplus A = 0$.

Здесь решением является такое сочетание столбцов, участвующих в векторной операции логического сложения, которое в совокупности дает результат, равный вектору экспериментальной проверки. Поскольку операция времязатратная, то для нее следует использовать мультипроцессор Хассе, ориентированный на взятие булеана в почти параллельном режиме.

Подводя итог, следует представить модель процесса диагностирования цифровых устройств, которая содержит функциональные преобразователи, связанные с выполнением следующих шагов (рис. 2):

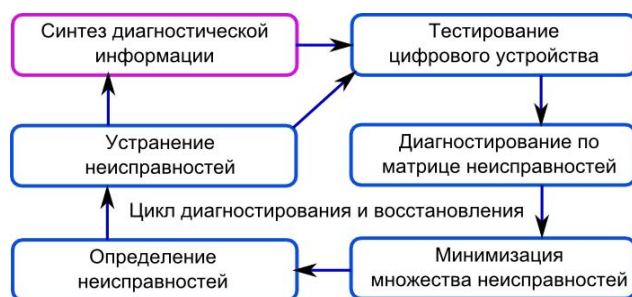


Рис. 2. Цикл диагностирования и ремонта логических блоков

1. Препроцессирование сводится к генерированию исходной диагностической информации в виде теста диагностирования, таблицы неисправностей и матрицы достижимостей цифровой системы.

2. Тестирование реального устройства на основе использования промышленного симулятора в целях сравнения фактических реакций устройства с эталонными значениями по наблюдаемым линиям-ассерциям, что дает возможность сформировать матрицу выходных реакций или вектор экспериментальной проверки в двоичном алфавите.

3. Вычисление матрицы активности графовой структуры на каждом входном тестовом наборе, равной по размерности таблице неисправностей, с помощью матрицы экспериментальной проверки и матрицы достижимостей, что дает возможность существенно сократить область подозреваемых дефектов.

4. Модификация содержимого таблицы неисправностей путем ее маскирования матрицей активности графовой структуры, в целях определения только тех неисправностей, которые действительно формируют матрицу экспериментальной проверки в процессе диагностирования.

5. Выполнение процедуры логического умножения над строками таблицы неисправностей для получения вектора подозреваемых дефектов.

6. Восстановление работоспособности цифрового устройства путем переадресации неисправных логических компонентов на их аналоги из ремонтного запаса и повторение процесса тестового диагностирования.

Таким образом, новизна предложенного метода диагностирования дефектов заключается в использовании для получения диагноза единственной параллельной операции логического умножения, что в сочетании со структурным маскированием неисправностей дает преимущества перед аналогами в части увеличения быстродействия и повышения глубины диагностирования.

3. Кубитное моделирование цифровых систем

Рассматриваются структуры данных, эффективные с точки зрения программной или аппаратной реализации исправного интерпретативного моделирования дискретных систем, описанных в форме кубитных векторов состояний выходов примитивов. Для описания цифровой схемы, представленной на рис. 3, традиционно используется структура взаимосвязанных элементов и кубические покрытия (таблицы истинности) логических элементов.

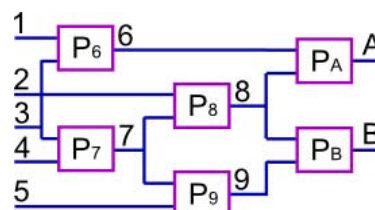


Рис. 3. Фрагмент цифровой схемы

Цель предлагаемого метода кубитного моделирования – заменить таблицы истинности компонентов циф-

рового устройства векторами состояний выходов. Пусть функциональный примитив с номером P_6 имеет следующую таблицу истинности:

$$P_6 = \begin{array}{c|cc|c} X_1 & X_2 & Y \\ \hline 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{array}$$

Данное покрытие логического элемента можно трансформировать путем унитарного кодирования входных векторов на основе использования двухтактного алфавита [4-7]. Символы и их коды, предназначенные для описания автоматных переменных, представляют собой булеан на универсуме из четырех примитивов, что соответствует формату вектора, содержащего два кубита:

$B^*(Y) = \{Q=(1000), E=(0100), H=(0010), J=(0001),$
 $O=\{Q,H\}=(1010), I=\{E,J\}=(0101), A=\{Q,E\}=(1100),$
 $B=\{H,J\}=(0011), S=\{Q,J\}=(1001), P=\{E,H\}=(0110),$
 $C=\{E,H,J\}=(1110), F=\{Q,H,J\}=(0111),$
 $L=\{Q,E,J\}=(1101), V=\{Q,E,H\}=(1110),$
 $Y=\{Q,E,H,J\}=(1111), U=(0000)\}.$

С помощью двухтактного алфавита любое покрытие функционального одновыходового примитива всегда можно представить двумя кубами или даже одним, учитывая, что кубы взаимно инверсны:

$$P_6 = \begin{array}{c|cc|c} 00 & 1 & \\ 01 & 1 & \\ 10 & 1 & \\ 11 & 0 & \end{array} = \begin{array}{c|c|c} Q & 1 & \\ E & 1 & \\ H & 1 & \\ J & 0 & \end{array} = \begin{array}{c|c|c} V & 1 & \\ J & 0 & \end{array} = \begin{array}{c|cc|c} 1110 & 1 & \\ 0001 & 0 & \end{array} \rightarrow \begin{array}{c|ccc|c} 1 & 1 & 1 & 0 & \end{array}$$

Два куба показывают не только все решения, но и инверсию сигналов на выходе, что интересно с позиции активизации всех логических путей в схемной структуре при синтезе тестов. Например, для изменения состояния выхода необходимо создать на входах пару следующих друг за другом условий, где в первом такте должны быть первые три вектора (адреса), а во втором – четвертый вектор, формируемый двумя входными переменными.

Для моделирования исправного поведения достаточно иметь только один куб (нулевой или единичный), поскольку второй всегда является дополнением к первому. Следовательно, ориентируясь, например, на единичный куб, формирующий на выходе 1, можно убрать бит состояния выхода примитива, что уменьшит размерность куба или модели примитива до количества адресуемых состояний элемента, где адрес есть вектор, составленный из двоичных значений входных переменных, по которому определяется состояние выхода примитива.

Кубитное покрытие, или Q-покрытие есть векторная интерпретативная форма задания функциональности, где значение координаты определяет состояние выхода функции, соответствующее двоичному входному слову, формирующему адрес ячейки. Q-покрытие одновыходового примитива всегда представлено дуэ-

мью взаимно инверсными кубами (векторами), размерность которых равна степени двойки от числа входных переменных, где единичное значение координаты определяет участие адреса рассматриваемого бита в формировании соответствующего (0,1) состояния выхода примитива. Кубитные модели примитивов требуют создания новой теории моделирования, прямой и обратной импликации, синтеза тестов, моделирования неисправностей, поиска дефектов. Здесь и далее представлены основные процедуры исправного моделирования на основе манипулирования адресами, неявно представленными в координатах кубов Q-покрытия.

Модель для анализа цифровой системы на основе использования кубитных структур данных может быть описана четырьмя компонентами:

$$\begin{aligned} F &= \langle L, M, X, Q \rangle, \\ L &= (L_1, L_2, \dots, L_j, \dots, L_n); \\ M &= (M_1, M_2, \dots, M_j, \dots, M_n); \\ X &= (X_{n_x+1}, X_{n_x+2}, \dots, X_{n_x+i}, \dots, X_n); \\ Q &= (Q_{n_x+1}, Q_{n_x+2}, \dots, Q_{n_x+i}, \dots, Q_n). \end{aligned}$$

Здесь представлены соответственно: L – вектор идентификаторов эквипотенциальных линий схемы цифровой системы, который ввиду своей тривиальности может быть исключен из модели, но при этом необходимо иметь число входных переменных устройства и общее количество линий; M – вектор моделирования состояний всех линий схемы; X – упорядоченная совокупность векторов входных переменных каждого примитива схемы, привязанных к номерам выходов, Q – совокупность Q-покрытий примитивов, строго привязанных к номерам выходов и входным переменным примитивов; n – число линий в схеме, n_x – количество входных переменных.

В качестве примера кубитного задания модели цифрового устройства $F = \langle L, M, X, Q \rangle$, ниже приведен вариант структурной таблицы описания схемы для анализа исправного поведения:

L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B
M	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0
X	13	34	27	75	68	89
Q	1	0	1	1	1	1	
	1	1	0	0	0	0	
	1	1	0	0	1	1	
	0	1	0	1	0	1	

Метод кубитного моделирования исправного поведения сводится к определению значения выхода элемента по адресу, формируемому конкатенацией двоичных состояний входных переменных каждого примитива цифровой системы

$$M(Y_i) = Q_i[M(X_{i1} * X_{i2} \dots * X_{ij} \dots * X_{ik_i})].$$

Здесь k_i – число входных линий в примитиве с номером i . Поскольку номера невходных линий век-

тора L однозначно идентифицируют по выходам обрабатываемые примитивы, то формула моделирования может быть приведена к циклу определения состояний всех невходных переменных:

$$M_i = Q_i[M(X_{i1} * X_{i2} \dots * X_{ij} \dots * X_{ik_i})] = Q_i[M(A_i)], \quad i = \overline{n_x + 1, n}$$

Здесь процесс моделирования связан с конкатенированным формированием адреса бита в кубите функциональности, который определяет состояние примитива или невходной линии цифровой структуры, начиная с номера $i = n_x + 1$. Если переменные создают не двоичный адрес, то в данном случае существует возможность формирования состояния выхода логического элемента в троичном алфавите символом X. Состояния выходов формируются идеально примитивной процедурой обработки кубита примитива

$$M_i = Q_i[M(X_i)]$$

на основе простых итераций или итераций Зейделя [6,8]. Во втором случае необходима препроцессорная процедура ранжирования линий и примитивов схемы, которая позволяет существенно уменьшить количество проходов по элементам схемы для достижения сходимости, когда фиксируется равенство состояний всех линий в двух соседних итерациях. Кроме того, ранжирование примитивов по уровням формирования выходов дает возможность существенно повысить быстродействие моделирования за счет параллельной обработки функциональных элементов одного уровня. Например, для схемы, представленной на рис. 6, одновременно можно обрабатывать элементы с номерами 6,7, затем – 8,9 и далее – А,В. В первом случае, когда используются простые итерации, ранжирования не требуется, но платой за простоту алгоритма моделирования является существенно большее число итеративных проходов по примитивам схемы для достижения упомянутого критерия сходимости. Вычислительная сложность предложенного Q-метода моделирования на основе кубитных функциональностей определяется процедурами формирования адреса – входного вектора, содержащего k_i переменных, для каждого i-го примитива $[(r + w) \times k_i]$, считыванием бита из квант-вектора по конкатенированному адресу и записью $(r + w)$ данного бита в вектор моделирования:

$$\eta = \sum_{i=n_x+1}^n \{[(r+w) \times k_i] + (r+w)\} = \sum_{i=n_x+1}^n [(r+w) \times (k_i + 1)] = (r+w) \times \sum_{i=n_x+1}^n (k_i + 1).$$

Время моделирования одного тест-вектора Q-методом, при условии, что цифровая схема, составленная из 900 четырехвыходовых примитивов, имеет параметры: $r = w = 5ns$, $k_i = 4$, $n_x = 100$, $n = 1000$, равно 45 микросекунд:

$$\eta = (r + w) \times \sum_{i=n_x+1}^n (k_i + 1) = (5 + 5) \times 900 \times (4 + 1) = 10 \times 900 \times 5 = 45000ns = 45\mu s.$$

Это означает, что быстродействие интерпретативного Q-метода моделирования дает возможность для данной схемы обработать за одну секунду 22 222 входных наборов. При этом цифровое устройство имеет существенное преимущество – сервисную функцию online восстановления работоспособности в случае отказа примитива путем его переадресации на запасной элемент.

Для синтеза квазиоптимальных структур данных комбинационного устройства необходимо использовать следующие правила:

1) Ранжированная схема цифрового устройства по структурной глубине для моделирования по способу Зейделя должна иметь по возможности однотипные примитивы в каждом уровне (слое) срабатывания.

2) В каждом уровне желательно иметь одинаковое число примитивов. Поэтому синтез цифрового устройства следует ориентировать на создание прямоугольной (матричной) структуры однотипных логических элементов.

3) Реализация комбинационных примитивов предполагает использование адресуемых элементов памяти, имеющих место в программируемых логических устройствах (FPGA, CPLD), широко используемых для создания прототипов.

4) Формирование для каждого уровня комбинационного устройства ремонтных примитивов для восстановления работоспособности в режиме online из расчета – один запасной элемент на каждый тип компонента, используемый в уровне.

5) Стоимость аппаратных затрат для реализации комбинационного устройства, ориентированного на высокое быстродействие, должна определяться суммой всех примитивов, привязанных к уровням комбинационного устройства, дополненной линейкой запасных элементов по одному для каждого слоя (при условии существования в каждом слое одинаковых

$$\text{примитивов}): Q = \sum_{i=1, n}^{j=1, m} P_{ij} + n.$$

6) Реализация комбинационного устройства, ориентированного на минимизацию аппаратных затрат, определяется суммой всех типов примитивов, инвариантных к уровням комбинационного устройства, дополненной линейкой запасных элементов по одному

$$\text{для каждого типа: } Q = \sum_{i=1}^m P_i + m.$$

7) Обработка матрицы комбинационных элементов с помощью процессорной линейки примитивов, число которых равно мощности максимального уровня или слоя в прямоугольной структуре, что обеспечивает условия для параллельной обработки всех примитивов в каждом уровне элементов в целях повышения быстродействия комбинационного прототипа, реализуемого в PLD.

Таким образом, новизна предложенного Q-метода интерпретативного исправного моделирования цифровых схем заключается в существенном повышении быстродействия и уменьшении объемов структур данных за счет замены таблиц истинности на Q-покрытия, что практически делает разработку конкурентоспособной с технологиями компилятивного моделирования.

4. Восстановление работоспособности комбинационных устройств

Немногочисленные работы, посвященные восстановлению работоспособности логических схем [9-11], описывают две идеи. Первая заключается в реконфигурации структуры логических элементов в режиме offline, которая обеспечивает возможность замены каждого из неисправных примитивов. Вторая создает условия для замены неисправных элементов путем использования запасных логических компонентов и мультиплексоров для переадресации отказавших примитивов.

Структуры кубитных данных модифицируются в сторону дополнения строкой типов примитивов $F = \langle L, M, X, P, Q \rangle$, $P = (P_1, P_2, \dots, P_1, \dots, P_m)$, заданных при синтезе цифровой системы, если необходимо в процессе функционирования выполнять ремонт или восстановление работоспособности за счет введения запасных примитивов, которые, так же как и основные, реализуются на основе элементов памяти. На рис. 4 изображен пример схемной структуры из адресуемых и трех запасных элементов. Структуры данных, соответствующие данной схеме с тремя дополнительными элементами, представлены здесь же:

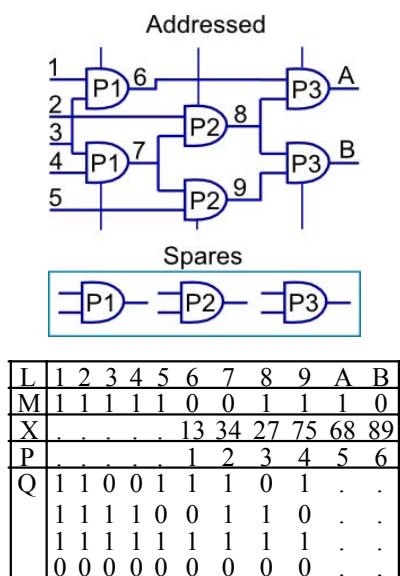


Рис. 4. Пример схемной структуры из адресуемых и запасных элементов

Таблица (см. рис. 4) оперирует номерами структурных примитивов, что дает возможность заменить любой отказавший элемент исправным из ремонтного запаса путем изменения адресного номера в строке

примитивов P. Ремонтные элементы в данной таблице начинаются со столбца номер 7.

В следующей таблице представлены строка типов логических элементов, а также адреса типов этих примитивов, отмеченные номерами:

L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B
M	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0
X	.	.	.	.	.	13	34	27	75	68	89
P	.	.	.	.	.	1	1	2	2	3	3
Q	1	0	1	1	0	1	.	.	.	.	.
	1	1	0	1	1	0	.	.	.	.	.
	1	1	1	1	1	1	.	.	.	.	.
	0	0	0	0	0	0	.	.	.	.	.

Эта структура данных ориентирована на программную реализацию моделирования, а ремонтные примитивы начинаются с номера 4. Если существует возможность перепрограммирования логики в элементе памяти с одинаковым числом входных переменных, то данную процедуру следует выполнять после фиксации неисправного элемента, когда становится известно – какой элемент в структуре и какой тип примитива отказал. Процедура восстановления работоспособности ориентирована на PLD-реализацию цифровых систем. Если кубитные модели схем не имеют запасных примитивов, то соответствующий формат таблиц будет иметь следующий вид:

L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B
M	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0
X	.	.	.	.	.	13	34	27	75	68	89
P	.	.	.	.	.	1	1	2	2	3	3
Q	1	0	1	.	.	.	.	.	.	.	.
	1	1	0	.	.	.	.	.	.	.	.
	1	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.
	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.

Таким образом, квантовые структуры данных ориентированы на компактность описания функционалов цифрового изделия кубитными векторами, повышение быстродействия процедур моделирования за счет адресации состояний выходов примитивов, а также на восстановление работоспособности отдельных логических элементов, благодаря их реализации в элементах памяти PLD или в форме программных модулей. Очень важно, что в последнем случае не нужно хранить ремонтные примитивы, поскольку предложенные здесь интерпретативные структуры табличных данных изначально ориентированы на технологические удобства устранения дефектов в процессе функционирования прототипа цифрового изделия.

Обработка схемы в кристалле сводится к определению адреса, составленного двоичными битами вектора моделирования, по которому находится значение логической функции. Каждый примитив имеет цикл обработки, содержащий три процедуры:

1) Адресное считывание номеров входных переменных из соответствующего столбца матрицы X для формирования адреса состояния входной переменной вектора моделирования: $A = X_{ij}$, $i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, s_p - 1}$.

2) Формирование адреса (двоичного кода) для вычисления логической функции путем конкатенации соответствующих состояний входных переменных в векторе моделирования $A = M(X_{ij}) * M(X_{ir})$.

3) Запись результата выполнения логической функции как состояния выхода в соответствующий разряд вектора моделирования

$$M(X_{is_p}) = P[M(X_{ij}) * M(X_{ir})].$$

Процесс обработки всех примитивов схемы в данном случае является строго последовательным, что представляет собой существенное замедление процедуры формирования состояний выходных переменных. Однако уменьшение быстродействия можно считать платой за сервис встроенного и автономного восстановления работоспособности цифровой структуры, который является одним из этапов функционирования инфраструктуры обслуживания SoC, представленной на рис. 5.

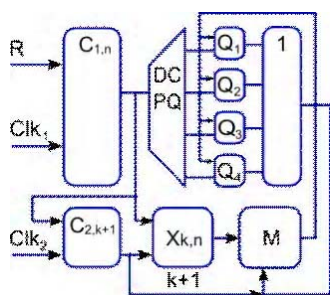


Рис. 5. Операционная структура комбинационной схемы

Комбинационная схема становится операционным устройством, где присутствуют операционный и управляющий автоматы. Заменяемыми компонентами в операционном автомате являются типы примитивов – функциональные элементы или структурные примитивы.

Операционное устройство для реализации элементарно-адресуемых комбинационных схем содержит: счетчик обработки текущего примитива C_1 ; память для хранения типов примитивов, соответствующих структурным элементам P ; счетчик считывания номеров входных и выходной переменных текущего примитива C_2 ; дешифратор типов примитивов DC ; память для хранения вектора моделирования M ; матричная память для хранения номеров входов-выходов структурных примитивов X ; линейка памятей, реализующих функциональные примитивы $P(Q)$; регистр формирования входного адресного слова для обрабатываемого примитива RG ; логический элемент Or для коммутации результатов обработки функциональных примитивов.

Граф-схема алгоритма управления процессом моделирования структуры комбинационной схемы представлена на рис. 6 и содержит следующие шаги:

1. Инициализация (формирование) всех компонентов (номера и типы элементов, линии связей для входов и выходов логических элементов) схемной структуры:

$$P = (P_1, P_2, \dots, P_1, \dots, P_n); Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_j, \dots, Q_m);$$

$$X = [X_{pq}]; p = \overline{1, n}; q = \overline{1, s_p}.$$

2. Инициализация параметра обрабатываемого примитива и номера входного набора $i=0, t=0$ для его моделирования в двоичном алфавите $M_r = \{0, 1\}$.

3. Инкрементирование индекса примитива, номера теста и инициализация входного тестового (рабочего) набора: $i = i + 1, t = t + 1, M(X) = T_t(X), |T_t(X)| = \eta$.

4. Конкатенация (#) разрядов слова для формирования входного воздействия $\# M(X_{ij})$ логического элемента P_i (типа Q_i) и выполнение процедуры определения состояния его выхода с последующей записью в соответствующую координату вектора моделирования: $M(X_{k+1})$:

$$M(X_{k+1}) = \{P_i, Q_i\} \left[\# M(X_{ij}) \right].$$

5. Повторение пунктов 3 и 4 в целях получения состояний выходов всех логических элементов до выполнения условия: $i = n$.

6. Повторение пунктов 2–4 в целях моделирования всех входных тестовых (рабочих) наборов, до выполнения равенства: $t = \eta$, где η – длина теста.

7. Окончание процесса моделирования цифрового устройства.

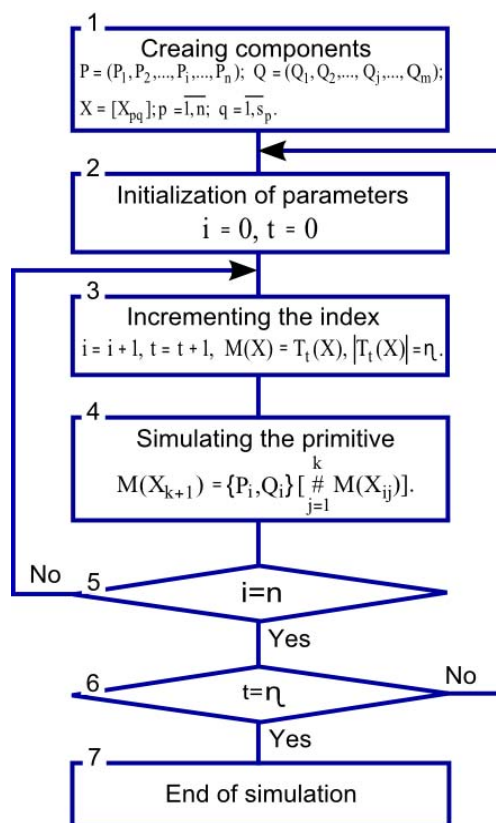


Рис. 6. Граф-схема алгоритма управления процессом моделирования

Таким образом, научная новизна предложенной модели цифровой системы заключается во введении в структуру устройства избыточных ремонтных компонентов и управляющего автомата, ориентированного на последовательную обработку комбинационных примитивов, что дает возможность осуществлять процедуру переадресации примитивов в случае отказа одного из них. Нетрудно создать аналогичные автоматы для параллельной обработки слоев из примитивов ранжированной схемы, что максимально приблизит быстроедействие устройства к его реализации в кристаллах PLD.

5. Заключение

Научная новизна и практическая значимость данной публикации, основанная на применении кубитных структур, ориентированных на параллельное вычисление теоретико-множественных по сути данных, формируется в следующие пункты:

1. Усовершенствован метод диагностирования дефектов цифровых систем за счет использования единственной параллельной операции логического умножения, что в сочетании со структурным маскированием неисправностей дает преимущества перед аналогами в части компактности представления данных, увеличения быстродействия и повышения глубины диагностирования.
2. Предложен новый Q-метод интерпретативного исправного моделирования цифровых схем, который характеризуется использованием компактных Q-покрытий вместо таблиц истинности, что дает возможность существенно повысить быстродействие анализа за счет адресного формирования выходов функциональных примитивов и уменьшить объемы структур данных, что практически делает метод конкурентоспособным с технологиями компилятивного моделирования.
3. Усовершенствована модель цифровой системы путем дополнения в структуру устройства избыточных ремонтных компонентов и управляющего автомата, ориентированного на последовательную обработку комбинационных примитивов, что дает возможность осуществлять процедуру переадресации отказавших примитивов в режиме штатного функционирования.
4. Показаны примеры использования кубитных структур данных и квантовых преобразований для моделирования цифровых схем и решения задач диагностирования путем использования векторных параллельных логических операций и ремонта неисправных модулей на основе адресуемых логических примитивов.
5. Основная инновационная идея квантовых или кубитных вычислений заключается в переходе от вычислительных процедур над байт-операндом, определяющим в дискретном пространстве одно решение (точку), к квантовым параллельным процессам над кубит-операндом, одновременно формирующим булеан решений.

Литература: 1. *Michael A. Nielsen & Isaac L. Chuang.* Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press. 2010. 676р. 2. *Проектирование и тестирование цифровых систем на кристаллах/В.И. Хаханов, Е.И. Литвинова, О.А. Гузь.* Харьков: ХНУРЭ. 2009. 484 с. 3. *Hahanov V., Wajeb Gharibi, Litvinova E., Chumachenko S.* Information analysis infrastructure for diagnosis // Information an int. interdisciplinary journal. Japan. 2011. Vol.14. № 7. P. 2419-2433. 4. *Хаханов В.И., Мурад Али А., Литвинова Е.И., Гузь О.А., Хаханова И.В.* Квантовые модели вычислительных процессов // Радиоэлектроника и информатика. 2011. № 3. С.35-40. 5. *Бондаренко М.Ф., Хаханов В.И., Литвинова Е.И.* Структура логического ассоциативного мультипроцессора. Автоматика и телемеханика. 2012. № 10. С. 71-92. 6. *Хаханов В.И.* Техническая диагностика цифровых и микропроцессорных структур. К.: ИСМО. 1995. 242 с. 7. *Vladimir Hahanov, Alexander Barkalov and Marian Adamsky.* Infrastructure intellectual property for SoC simulation and diagnosis service. Springer, 2011. P. 289-330. 8. *Горбатов В.А.* Основы дискретной математики. М.: Высш. шк. 1986. 311 с. 9. *Хаханов В.И., Литвинова Е.И., Хаханова И.В., Murad Ali Abbas.* Инфраструктура встроенного восстановления логических PLD-схем// Радиоэлектроника и информатика. 2012. №2. С. 54-57. 10. *Hahanov V., Litvinova E., Gharibi W., Murad Ali Abbas.* Qubit models for SoC Synthesis Parallel and cloud computing. USA. 2012. Vol.1. Iss 1. P. 16-20. 11. *Hahanov V.I., Litvinova E.I., Chumachenko S.V., Baghdadi Ammar Awni Abbas, Eshetie Abebech, Mandefro.* Qubit Model for solving the coverage problem // Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium. IEEE. USA. Kharkov. 14-17 September 2012. P.142 - 144. 12. *Чжен Г., Мэннинг Е., Мемц Г.* Диагностика отказов цифровых вычислительных систем. М.: Мир, 1972. 230 с. 13. *Koal T., Scheit D., Vierhaus H.T.* A comprehensive scheme for logic self repair // Conf. Proc. on Signal Processing Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications. 2009. P. 13 – 18.

Поступила в редколлегия 25.08.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Кривуля Г.Ф.

Хаханов Владимир Иванович, декан факультета КИУ, д-р техн. наук, профессор кафедры АПБТ ХНУРЭ. Научные интересы: проектирование и тестирование вычислительных систем, сетей и программных продуктов. Увлечения: баскетбол, футбол, теннис, горные лыжи. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. +380 57 70-21-326, E-mail: hahanov@kture.kharkov.ua.

Baghdadi Ammar Awni Abbas, аспирант кафедры АПБТ ХНУРЭ. Научные интересы: проектирование и тестирование вычислительных систем. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. +380 57 70-21-326, E-mail: hahanov@kture.kharkov.ua.

Чумаченко Светлана Викторовна, д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой АПБТ ХНУРЭ. Научные интересы: дискретная математика, моделирование вычислительных систем. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. +380 57 70-21-326, E-mail: ri@kture.kharkov.ua.

Шкиль Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры АПБТ ХНУРЭ. Научные интересы: проектирование и тестирование вычислительных систем. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. +380 57 70-21-326, E-mail: shkil@kture.kharkov.ua.

Меликян Вазген, д-р техн. наук, профессор Государственного инженерного университета Армении. Научные интересы: design&test. Адрес: Армения, Ереван, ул. Теряна, 105, тел: (374 10) 524 629.



МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В НЕРАВНОМЕРНОМ БАЗИСЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

*БАРАННИК В.В., РЯБУХА Ю.Н.,
КРАСНОРУЦКИЙ А.А.*

Разрабатывается метод реконструкции изображений в неравномерном базисе спектральных коэффициентов. Он устраняет основные недостатки, присущие статистическим кодам, позволяет производить восстановление сегментированного изображения в соответствии с заданными значениями времени декодирования и качества реконструкции изображения в условиях заданной вычислительной среды.

Введение

При обработке и доставке видеотрафика в современных телекоммуникационных системах неотъемлемыми этапами обработки видеоданных являются этапы сжатия видео, передачи видеопотока и восстановления его на приемной стороне.

Для организации восстановления потока видеоданных в современных технологиях применяются методы декомпрессии, базирующиеся на реконструкции изображений с последующим декодированием компонент трансформант статистическими декодерами.

При восстановлении сжатого сегмента видеоданных декодер в первую очередь должен из непрерывного потока бит восстановить кодовые слова, соответствующие трансформированным квантованным компонентам преобразования. Этот шаг реализуется с помощью табличного преобразования. При этом используются таблицы стандартного энтропийного кода с заранее известной статистикой, а также таблицы ссылок (индексов или категорий), расположенных в порядке возрастания частот вхождений, и таблицы кодов для коэффициентов трансформанты, известные на приемной и передающей сторонах [1].

После умножения на коэффициенты нормализации получается деквантованный сегмент видеоданных. Полностью восстановленный сегмент видеоданных образуется после обратного дискретного косинусного преобразования (ДКП).

Полученные значения элементов сегмента видеоданных имеют определенные отличия от исходных. Это объясняется тем, что на этапе сжатия используется квантование и округление вещественных чисел.

Применяемые методы восстановления видеоданных недостаточно эффективны при обработке изображений и не удовлетворяют требованиям, которые предъявляются к ним, по времени обработки и качеству восстановления видеоданных [2].

Значит, совершенствование технологий и методов восстановления трансформированных изображений в целях снижения времени обработки и повышения качества реконструкции является актуальной научно-прикладной задачей.

Методы восстановления изображений, реализованные на основе статистических кодов, имеют ряд существенных недостатков, основные из которых заключаются в следующем:

- при декодировании используются неравномерные коды. Поэтому возникает необходимость использования разделителей (маркеров) между кодограммами трансформант. Наряду с этим, статистические кодовые конструкции имеют низкую помехоустойчивость. В случае помех в процессе передачи маркеры могут восприниматься не как служебная часть пакета видеоданных, а как информационная часть, что ведет к снижению достоверности восстановленных видеоданных. Ошибки, внесенные в результате помех в канале связи, в процессе восстановления изображения приобретают лавинный характер. В большинстве случаев это приводит к полному разрушению сегмента изображения;

- элементы трансформанты декодируются только последовательно. В этом случае не удается обеспечить параллельную обработку данных. Это обусловлено тем, что неизвестно расположение кодовых эквивалентов элементов трансформанты в кодограмме, построенных с использованием статистического принципа. Для восстановления коэффициентов сегментов видеоданных применяется поиск по кодовым таблицам. Это ограничивает возможность снизить время обработки;

- процесс декодирования неравномерных статистических кодов имеет относительно несложную реализацию. Однако такая обработка связана с необходимостью неоднократного обхода дерева в процессе декодирования кодовой последовательности. Это является причиной увеличения временной задержки на восстановление изображения;

- использование кодовых таблиц при декодировании приводит к необходимости хранения на приемной и передающей стороне значительного объема служебных данных. Это требует увеличения объемов оперативных запоминающих устройств.

Для устранения выявленных недостатков статистических методов кодирования видеоданных был предложен метод кодирования трансформант ДКП на основе неравномерного базиса спектральных коэффициентов [3]. Метод кодирования в неравномерном базисе спектральных коэффициентов (НБСК) работает с трансформированным сегментом ортогонального

преобразования (ДКП). Трансформанта ДКП представлена в виде двумерного массива, элементами которого являются дискретные значения базисных функций. При одномерной выборке столбца трансформанты образуется одномерное число в неравномерном базисе спектральных коэффициентов, удовлетворяющих смешанной системе оснований. Рассмотренный метод изложен в [4]. Под одномерным кодированием трансформированного сегмента в НБСК определен процесс формирования кода $N_i^{(\zeta, \gamma)}$ для i -го столбца $Y_i^{(\zeta, \gamma)}$, $(z; g)$ -й трансформанты ДКП. С учетом заданной системы оснований $\Lambda^{(\zeta, \gamma)}$ процесс кодирования i -го столбца $(\zeta; \gamma)$ -й трансформанты ДКП определяется выражением:

$$N_i^{(\zeta, \gamma)} = \sum_{j=1}^n y_{ij} \prod_{\eta=j+1}^n \lambda_{\eta},$$

где $\prod_{\eta=i+1}^n \lambda_{\eta}$ – весовой коэффициент элемента y_{ij} ; y_{ij} – элемент столбца трансформанты.

Рассмотренный метод позволяет производить формирование кода в соответствии с заданными значениями битовой скорости, времени кодирования и качества реконструкции изображения в условиях заданной вычислительной среды. Но для него является актуальной разработка метода восстановления на основе реконструкции трансформант ДКП.

Отсюда *цель исследований* заключается в разработке метода восстановления изображений в неравномерном базисе спектральных коэффициентов, позволяющего производить восстановление сегментированных изображений в соответствии с заданными значениями времени и качества восстановления.

Основной материал

Разрабатываемый метод восстановления заключается в получении по значению кода числа НБСК исходной трансформанты ДКП. Реконструкция сегмента изображения производится после обратного ДКП. Данный метод имеет ряд особенностей, определяемых процессом сжатия изображения [5].

Для восстановления сегмента ДКП необходимо наличие служебной информации о размерах сегмента $(\zeta; \gamma)$ и системе оснований $\Lambda^{(\zeta, \gamma)}$. Система оснований определяет длину информационной части сжатого представления трансформанты.

Это элементы системы оснований используются как составляющие аналитического выражения, на основании которого производится декодирование элементов столбцов трансформанты ДКП.

На приемной стороне система оснований содержится в служебной части кодовой последовательности сжатого представления трансформанты.

Система оснований позволяет определить верхнюю границу h_{\max} значения кода одномерного числа НБСК. Из свойств НБСК чисел следует, что максимальное значение кода определяется из неравенства:

$$N_{\max}^{(\zeta, \gamma)} < h_{\max},$$

где $N_{\max}^{(\zeta, \gamma)}$ – максимально возможное значение кода для заданного вектора оснований $\Lambda^{(\zeta, \gamma)}$.

Знание верхней границы h_{\max} необходимо для определения длины кодового представления $d_i^{(\zeta, \gamma)}$ одной компоненты $Y_i^{(\zeta, \gamma)}$ трансформанты. В этом случае принимается условие:

$$d_i^{(\zeta, \gamma)} = [\log_2 h_{\max}] + 1, \quad (1)$$

где $d_i^{(\zeta, \gamma)}$ – длина кодового представления i -го столбца трансформанты; $[\log_2 h_{\max}] + 1$ – количество двоичных разрядов на представление максимального значения кода $N_{\max}^{(\zeta, \gamma)}$ одномерного числа НБСК.

Тогда длина $d_{\inf}^{(\zeta, \gamma)}$ всей информационной части кодовой последовательности составит:

$$d_{\inf}^{(\zeta, \gamma)} = m([\log_2 h_{\max}] + 1),$$

где m – количество столбцов трансформанты; $m([\log_2 h_{\max}] + 1)$ – количество разрядов на представление m кодов НБСК чисел.

Верхняя граница h_{\max} значения кода одномерного числа НБСК для заданной системы оснований $\Lambda^{(\zeta, \gamma)}$ вычисляется как накопленное произведение оснований всех элементов, т.е.

$$h_{\max} = \prod_{\eta=1}^n \lambda_{\eta}. \quad (2)$$

С учетом выражения (2) формула (1) примет вид:

$$d_i^{(\zeta, \gamma)} = [\log_2 \prod_{\eta=1}^n \lambda_{\eta}] + 1.$$

Зная длину кодового представления для одного столбца трансформанты ДКП в неравномерном базисе спектральных коэффициентов, получаем возможность определить длину $d_{\inf}^{(\zeta, \gamma)}$ информационной части кодовой последовательности трансформанты. Она соответствует сумме длин кодовых представлений в НБСК всех столбцов трансформанты, т.е.

$$d_{\inf}^{(\zeta, \gamma)} = m d_i^{(\zeta, \gamma)} = m([\log_2 \prod_{\eta=1}^n \lambda_{\eta}] + 1).$$

Кодовая последовательность формируется на приемной стороне на основе полученных пакетов данных (рис. 1). Структура пакета подразумевает наличие служебной (СЧ) и информационной частей (ИЧ), а кодограммы формируются на основе информационных частей пакетов данных.

Длина $d^{(\zeta;\gamma)}$ собранной кодовой последовательности всей трансформанты ДКП определяется как количество бит, которым представлена служебная часть $d_s^{(\zeta;\gamma)}$ и длина $d_{inf}^{(\zeta;\gamma)}$ кодового представления всех столбцов трансформанты, она выражается формулой:

$$d^{(\zeta;\gamma)} = d_s^{(\zeta;\gamma)} + d_{inf}^{(\zeta;\gamma)}.$$

Для проведения декодирования чисел в неравномерном базисе спектральных коэффициентов необходимо выделить служебную и информационную части собранной кодовой последовательности. Это вызвано тем, что длина информационной части может изменяться для разных сегментов трансформированного изображения. Длина информационной части кодового представления трансформанты может изменяться из-за того, что:

- размеры сегментов изображения могут быть различными;
- сегменты изображения могут иметь разную систему оснований, что объясняется разной содержательной частью трансформанты изображения (рис. 2).

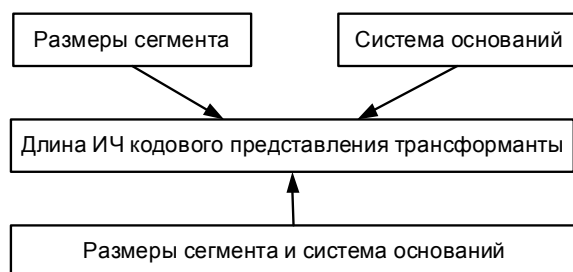


Рис. 1. Основные условия, влияющие на длину информационной части кодового представления трансформанты

Выборка информационной части из общей кодовой последовательности производится исходя из особенностей построения кода. Технология определения

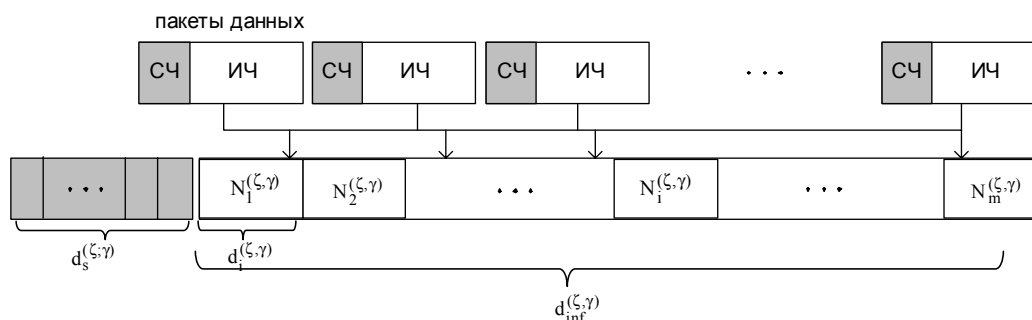


Рис. 1. Технология определения информационной и служебной части трансформанты ДКП

информационной части заключается в том, чтобы в общей длине кодовой последовательности определить границу служебной части.

Для этого необходимо:

1. Отвести под длину служебной части $d_{s,j}^{(\zeta;\gamma)}$ кодового представления числа НБСК для одной j -й строки $(\zeta;\gamma)$ трансформанты ДКП b бит (например, $b = 8$ бит). Длина кодового представления элемента основания составит:

$$d_{s,1}^{(\zeta;\gamma)} \dots d_{s,j}^{(\zeta;\gamma)} \dots d_{s,n}^{(\zeta;\gamma)} = \log_2 b.$$

Тогда длина служебной части $d_s^{(\zeta;\gamma)}$ всей кодовой последовательности трансформанты ДКП соответственно определяется длинами кодовых представлений всех элементов основания:

$$d_s^{(\zeta;\gamma)} = n d_{s,j}^{(\zeta;\gamma)} = n \log_2 b,$$

где n – количество строк трансформанты ДКП.

2. Выделить из собранной кодовой последовательности служебную часть. Первый бит всей кодовой последовательности является служебным, а длина ее служебной части составляет $n \log_2 b$ бит. Следующий за ним $n \log_2 b + 1$ бит будет информационным.

3. Определим длину информационной части кодового представления трансформанты ДКП. Необходимо перемножить все основания $\prod_{\eta=1}^n \lambda_{\eta}$ для $(\zeta;\gamma)$ -й трансформанты ДКП $\gamma^{(\zeta;\gamma)}$. Получим максимальную длину $d_i^{(\zeta;\gamma)}$ кодового представления одного столбца трансформанты ДКП, равную: $d_i^{(\zeta;\gamma)} = [\log_2 \prod_{\eta=1}^n \lambda_{\eta}] + 1$.

Затем определим длину $d_{inf}^{(\zeta;\gamma)}$ кодового представления информационной части всей кодовой последовательности $N^{(\zeta;\gamma)}$ трансформанты ДКП:

$$d_{inf}^{(\zeta;\gamma)} = m([\log_2 \prod_{\eta=1}^n \lambda_{\eta} + 1]).$$

4. Позиция первого бита кодового представления следующей трансформанты относительно текущей

определяется как $P_i^{(\zeta+1;\gamma)} = P^{(\zeta;\gamma)} + 1$, где $P^{(\zeta;\gamma)}$ – последняя позиция кодограммы предыдущей трансформанты, которая находится как:

$$P^{(\zeta;\gamma)} = n \log_2 b + m([\log_2 \prod_{\eta=1}^n \lambda_{\eta}] + 1).$$

Таким образом, нет необходимости использования маркеров-разделителей для разделения служебной и информационной частей кодовой конструкции.

После выделения информационной части собранной кодовой последовательности начинается процесс восстановления трансформированного изображения. Последовательность восстанавливающих преобразований распределена по трем основным процедурам: декодирования НБСК, адаптивного деквантования и обратного ДКП.

Общая схема процесса реконструкции изображения представлена на рис 3.

На вход декодера поступает совокупность $\{\Lambda^{(\zeta,\gamma)}; N_i^{(\zeta,\gamma)}\}$: вектор оснований $\Lambda^{(\zeta,\gamma)}$ и $N_i^{(\zeta,\gamma)}$ кодовые представления столбцов (z; g)-й трансформанты ДКП. Далее проводится декодирование в неравномерном базисе спектральных коэффициентов.

В результате декодирования получим трансформированный сегмент изображения $Y^{(\zeta,\gamma)}$.

При адаптивном деквантовании компонент трансформант происходит восстановление части видеoinформации, отброшенной для устранения визуальной избыточности. Эта процедура реализуется умножением компонент трансформанты $Y^{(\zeta,\gamma)}$ на элементы матрицы квантования. Для дальнейшей обработки при обратном трансформировании используется деквантованный сегмент ДКП $Y^{*(\zeta,\gamma)}$. Обратное трансформирование реализуется при обратном ДКП. Далее производится сборка сегментов изображения и его восстановление. На выходе схемы восстановления получим восстановленный массив изображения $X'_{i,j}$.

Процесс декодирования кодового представления трансформанты ДКП в НБСК представлен на рис.4.

Для начала процесса декодирования в НБСК необходимо иметь вектор оснований $\Lambda^{(\zeta,\gamma)} = \{\lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n\}$ и вектор весовых коэффициентов $H^{(\zeta,\gamma)} = \{h_1^{(\zeta,\gamma)}, \dots, h_i^{(\zeta,\gamma)}, \dots, h_n^{(\zeta,\gamma)}\}$ элементов столбцов трансформанты.

Система оснований известна из служебной части кодового представления трансформанты ДКП.

Весовые коэффициенты для элементов i -го столбца (z;g)-й трансформанты определяются на основании

$$\text{выражения: } h_i^{(\zeta,\gamma)} = \prod_{\eta=i+1}^n \lambda_{\eta}.$$

С учетом системы оснований $\Lambda^{(\zeta,\gamma)}$ для i-го столбца (z;g)-й трансформанты и весовых коэффициентов процедура декодирования компоненты $y_{i,j}^{(\zeta,\gamma)}$ трансформанты строится по следующему правилу:

$$y_{i,j}^{(\zeta,\gamma)} = \left[\frac{N_i^{(\zeta,\gamma)}}{h_i^{(\zeta,\gamma)}} \right] - \left[\frac{N_i^{(\zeta,\gamma)}}{\lambda_i h_i^{(\zeta,\gamma)}} \right] \lambda_i, \quad i = 1, m, \quad (3)$$

где $y_{i,j}^{(\zeta,\gamma)}$ – декодированный элемент i -го столбца трансформанты; $N_i^{(\zeta,\gamma)}$ – кодовое представление i -го столбца трансформированного сегмента в неравномерном базисе спектральных коэффициентов; λ_i – основание элемента i -го столбца трансформированного сегмента НБСК.

Компоненты столбцов трансформанты восстанавливаются в пределах столбца сверху - вниз, а сами столбцы поочередно слева - направо. Таким образом, формируются все элементы для каждого столбца трансформанты. В результате декодирования получим элементы всех столбцов трансформированного сегмента изображения.

Далее, производится деквантование. Для получения элементов $y_{i,j}^{*(\zeta,\gamma)}$ деквантованного сегмента $Y^{*(\zeta,\gamma)}$ трансформанты ДКП производится умножение элементов $y_{i,j}^{(\zeta,\gamma)}$ декодированного НБСК трансформированного сегмента $Y^{(\zeta,\gamma)}$ изображения на элементы $q_{i,j}$ матрицы квантования: $y_{i,j}^{*(\zeta,\gamma)} = y_{i,j}^{(\zeta,\gamma)} q_{i,j}$.

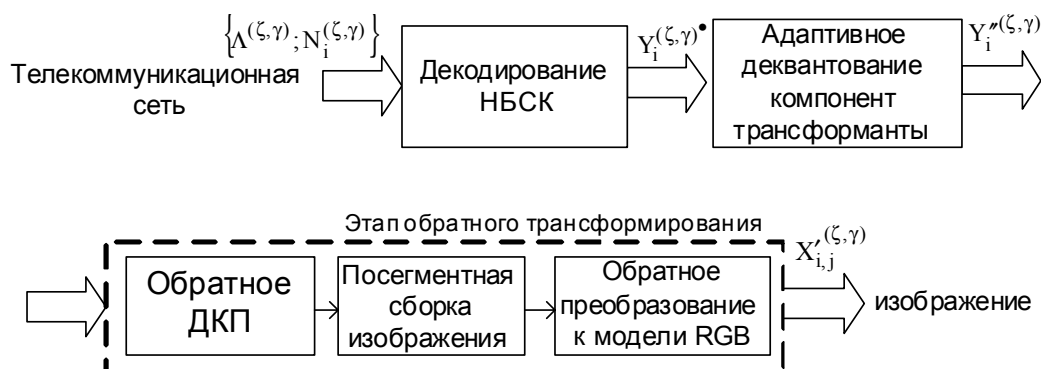


Рис. 3. Общая схема восстановления трансформированного изображения

Согласно схеме восстановления сегментированного изображения выполняется обратное ДКП. Обратное ДКП сегмента изображения осуществляется на основе процедуры:

$$x'_{i,j} = \frac{1}{\sqrt{mn}} C(i) C(j) \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} y''_{i,j}(\zeta, \gamma) \cos \left[\frac{(2\zeta+1)i\pi}{2n} \right] \cdot \cos \left[\frac{(2\gamma+1)j\pi}{2m} \right]$$

где $C(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & x = 0 \\ 1, & x \neq 0 \end{cases}$, $x'_{i,j}$ – элемент восстанов-

ленного сегмента изображения.

Оценка характеристик процесса восстановления трансформированного сегмента изображения базируется на оценке величины среднеквадратичного отклонения и времени выполнения операций реконструкции одной трансформанты изображения.

Время реконструкции $T^{(\zeta, \gamma)}$ сегмента изображения определяется общим временем декодирования трансформанты ДКП, деквантования и обратного трансформирования (выполнения обратного ДКП, сборки сегментов изображения), т.е.:

$$T^{(\zeta, \gamma)} = T_{dc}^{(\zeta, \gamma)} + T_{dq}^{(\zeta, \gamma)} + T_{odcp}^{(\zeta, \gamma)},$$

где $T_{dc}^{(\zeta, \gamma)}$ – время декодирования $(z; g)$ -го сегмента изображения на основе НБСК; $T_{dq}^{(\zeta, \gamma)}$ – время деквантования $(z; g)$ -го сегмента изображения; $T_{odcp}^{(\zeta, \gamma)}$ –

время выполнения обратного дискретного косинусного преобразования.

Временные затраты на декодирование одной трансформанты ДКП $T_{dc}^{(\zeta, \gamma)}$ определяется временем декодирования кода НБСК для всех столбцов трансформированного $(z; g)$ сегмента изображения:

$$T_{dc}^{(\zeta, \gamma)} = \sum_{i=1}^m t_{dc_i} = m t_{dc_i}, \quad (4)$$

где t_{dc_i} – время восстановления одного столбца трансформанты ДКП.

Время декодирования t_{dc_i} одного j -го столбца трансформанты ДКП, состоящего из n элементов, определяется по формуле:

$$t_{dc_i} = \sum_{j=1}^n t_{dc_{i,j}} = n t_{dc_{i,j}}, \quad (5)$$

здесь $t_{dc_{i,j}}$ – время получения элемента столбца трансформанты ДКП.

Учитывая выражение (5), формула (4) примет вид:

$$T_{dc}^{(\zeta, \gamma)} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{dc_{i,j}} = m n t_{dc_{i,j}}.$$

Время реконструкции $T^{(\zeta, \gamma)}$ трансформированного $(z; g)$ -го сегмента изображения зависит от общего количества арифметических операций умножения, деления и вычитания, выполненных на всех этапах реконструкции трансформанты.

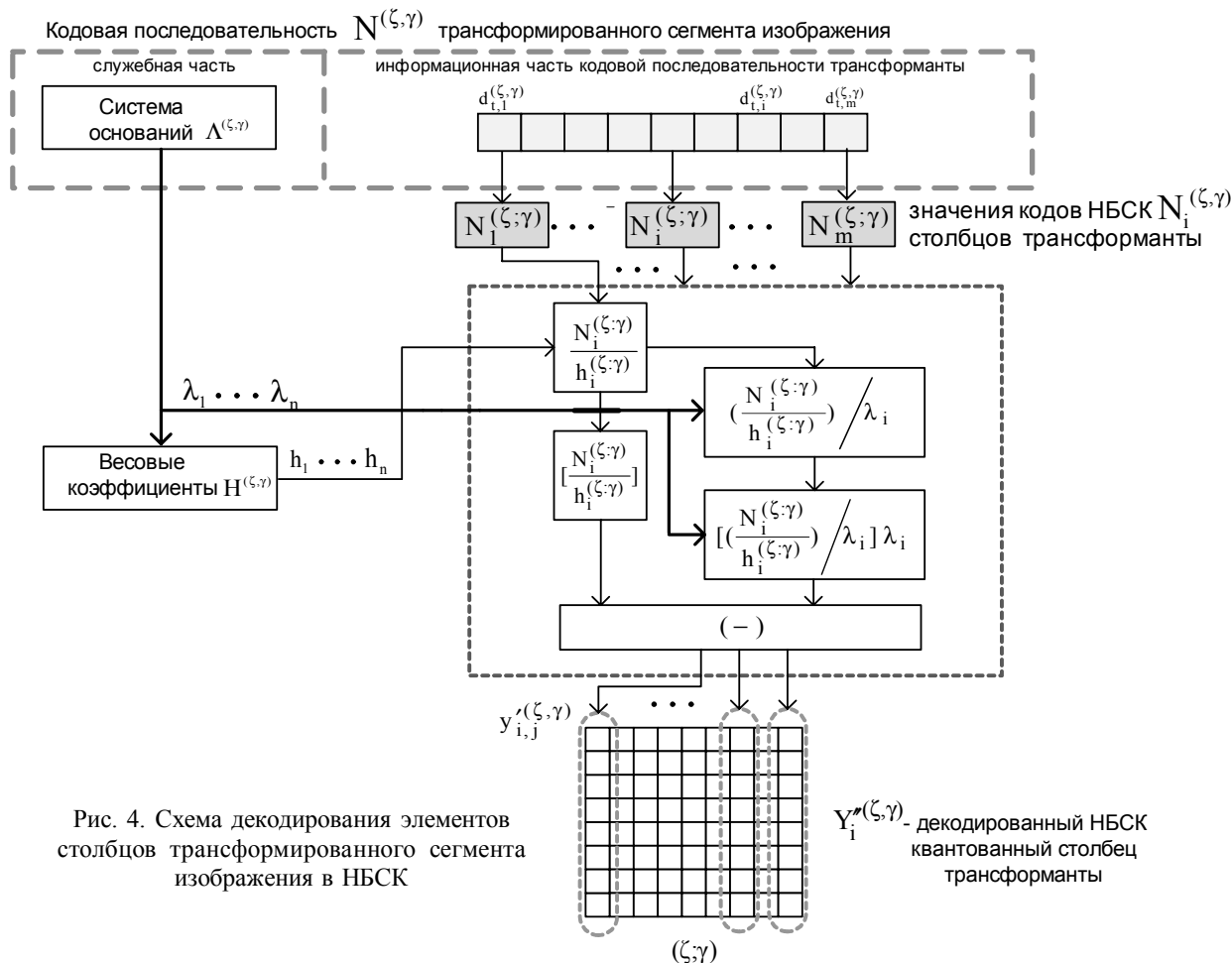


Рис. 4. Схема декодирования элементов столбцов трансформированного сегмента изображения в НБСК

Для декодирования одной компоненты трансформанты необходимо выполнить по две операции деления и умножения и одну операцию вычитания. Количество арифметических операций, выполняемых при реконструкции сегмента изображения, приведено в таблице.

Из анализа таблицы следует, что количество арифметических операций, необходимых для реализации предложенного метода декодирования, не оказывает существенного влияния на общее количество арифметических операций, необходимых для реконструкции сегмента изображения. Рассмотренный метод декодирования по количеству затрачиваемых операций не превосходит суммарные затраты на деквантование и обратное ДКП.

Оценка потерь качества восстановления проводится по критерию среднеквадратичного отклонения значений элементов исходного сегмента изображения и значений элементов восстановленного сегмента изображения:

$$\sigma(\zeta, \gamma) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m_{\zeta}} \sum_{j=1}^{n_{\gamma}} \left(x'_{i,j}(\zeta, \gamma) - x_{i,j}(\zeta, \gamma) \right)^2}{m_{\zeta} n_{\gamma}}},$$

где $x'_{i,j}(\zeta, \gamma)$ – восстановленный элемент сегмента изображения; $x_{i,j}(\zeta, \gamma)$ – исходный элемент сегмента изображения.

Выводы

Разработан метод реконструкции изображений в неравномерном базисе спектральных коэффициентов, проведена оценка времени восстановления сегментированного изображения.

Определено количество операций на выполнение декодирования трансформированного сегмента изображения. Количество операций имеет линейную зависимость от размера сегмента. Предложенный метод декодирования по количеству операций на его реализацию не оказывает существенного влияния на процесс реконструкции изображения.

Рассмотренный метод реконструкции изображений устраняет основные недостатки, присущие процессу восстановления видеоданных, реализованных с помощью статистических декодеров:

– исключено применение маркеров, а именно для разделения служебной и информационной частей кодовой конструкции. Ошибки, внесенные в результате помех в канале связи, при восстановлении изображения не имеют разрушительных последствий для всего сегмента изображения. Это объясняется тем, что ошиб-

ки распространяются только в пределах одного кода одномерного числа в неравномерном базисе спектральных коэффициентов. Следовательно, их влияние распространится только на один столбец трансформанты;

– элементы трансформанты декодируются независимо друг от друга. В этом случае удается обеспечить параллельную обработку данных. Для восстановления элементов сегментов видеоданных используется система оснований, которая выступает в роли служебной информации. Отпадает необходимость применения кодовых таблиц и организации поиска по ним. Предложенная технология позволяет сократить время обработки видеоданных и снизить объем оперативных запоминающих устройств.

При исследовании информационных характеристик трансформант ДКП выявлены лучшие показатели по времени обработки относительно существующих технологий (от 1,5 раза и более).

Литература: 1. *Gonzales R.C.* Digital image processing / R.C. Gonzales, R.E. Woods. Prentice Inc. Upper Saddle River, New Jersey 2002. 779 p. 2. *Баранник В.В., Поляков В.П.*, Кодирование трансформированных изображений в инфокоммуникационных системах. Х. ХУПС. 2010. 210 с. 3. *Баранник В.В.* Метод сжатия изображений на основе неравномерного позиционного кодирования битовых плоскостей / В.В. Баранник, Н.К. Гулак, Н.А. Королева // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. Х.: ХНАУ "ХАІ", 2009. Вип. 1. С. 55–61. 4. *Barannik V.* Image Encoding Design Based On 2-D Combinatory Transformation / V. Barannik., V. Hahanov // International Symposium [IEEE East-West Design & Test], (Yerevan, Armenia, September 7 – 10, 2007) / Yerevan: 2007. P. 124 – 127. 5. *Баранник В.В.* Кодирование трансформированных изображений в инфокоммуникационных системах / В.В. Баранник, В.П. Поляков. Х.: ХУПС, 2010. 212 с.

Поступила в редколлегия 12.08.2013

Рецензент: д-р тех. наук, проф. Хаханов В.И.

Баранник Владимир Викторович, д-р техн. наук, проф., начальник кафедры Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: обработка информации в инфокоммуникационных системах. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Сумская, 77/79, тел. (057) 704-96-53.

Рябуха Юрий Николаевич, канд. техн. наук, соискатель кафедры Боевого применения и эксплуатации АСУ Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: кодирование и защита информации для передачи в телекоммуникационных сетях. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Сумская, 77/79, E-mail: barannik_v_v@mail.ru.

Красноруцкий Андрей Александрович, канд. техн. наук, начальник кафедры бортового оборудования и аэрокосмической разведки Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: кодирование и защита информации для передачи в телекоммуникационных сетях. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Сумская, 77/79, тел. (057) 704-96-53. E-mail: barannik_v_v@mail.ru.

Арифметические операции	Декодирование компоненты трансформанты (операций)	Декодирование трансформанты (m × n) (операций)	Деквантование трансформанты (m × n) (операций)	Обратное ДКП трансформанты (m × n) (операций)
Деление	2	2 m n	-	-
Умножение	2	2 m n	m n	2 m n log ₂ m n
Вычитание (сложение)	1	m n	-	2 m n log ₂ m n

КОДИРОВАНИЕ ВЕКТОРА ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ КОРТЕЖЕЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПРЕССИИ И С ТРАНСФОРМИРОВАНИЕМ КАДРОВ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

ТУРЕНКО С.В.

Обосновывается интерпретация усеченного вектора двухкомпонентных кортежей в виде укрупненного позиционного числа неопределенной длины, элементами которого являются коды двухэлементных биадических чисел, образованных для отдельных двухкомпонентных кортежей. Доказывается теорема, в результате чего получено кодообразующее соотношение, обеспечивающее формирование кода для укрупненного позиционного числа с неопределенной длиной по двухуровневой схеме, а именно на первом уровне формируется кодовое представление для отдельных двухкомпонентных кортежей, а на втором – осуществляется формирование общего кодового представления для кодов, полученных на первом уровне.

1. Введение

Развитие инфокоммуникационных технологий, с одной стороны, и возросшие потребности в получении видеoinформационных услуг – с другой диктуют необходимость дальнейшего совершенствования технологий компрессии оцифрованных изображений [1; 2]. Актуальность развития теоретических основ и технологий сжатия видеоданных обусловлена наличием тенденции значительно более высоких темпов роста видеоприложений по сравнению с внедрением высокоскоростных беспроводных технологий [1 – 3]. Одним из широко используемых стандартов является JPEG [2; 3]. Поэтому в статье предлагается направление дальнейшего развития такой технологии.

Для кодирования трансформант в технологиях JPEG платформы используются две базовых стратегии, различающиеся структурными подходами относительно рассмотрения трансформанты. Первая стратегия базируется на обработке трансформанты в компонентном описании. Вторая стратегия осуществляет кодирование трансформанты для битового описания.

Преимущество обработки трансформанты для компонентного описания относительно битового представления состоят в следующем:

1. Сокращается задержка на выявление закономерностей и кодирование данных.
2. Компонентная структура обладает большей интегрированностью относительно битовой структуры, а следовательно, наличием большего количества потенциально устранимой избыточности.

Стратегия кодирования квантизированной трансформанты для компонентного описания строится с учетом таких свойств как: концентрация основной энергии исходного сигнала в ограниченном количестве низкочастотных компонент трансформанты; выделение области высокочастотных компонент, оказывающих менее значимое влияние на визуальное восприятие изображений; появление компонент трансформанты с нулевыми значениями.

Такие свойства предопределили развитие базовых стратегий кодирования компонентного представления трансформанты [3; 4]. Здесь на *первом* этапе осуществляется выделение длин ℓ_α цепочек, состоящих из компонент трансформанты, имеющих после квантизации нулевые значения. В результате на *втором* этапе обработки формируются двухкомпонентные кортежи (ДК). Двухкомпонентный кортеж $\{\ell_\alpha; c_\alpha\}$ содержит в себе длину ℓ_α предшествующей значимой компоненте c_α цепочки компонент с нулевыми значениями.

Таким образом, необходимо обосновать и создать развитие теоретической базы относительно обработки ДК линейаризированных трансформант. При этом требуется, чтобы построенная технология кодирования векторов ДК обладала потенциалом для снижения битовой скорости сжатого потока видеоданных по базовым кадрам в условиях отсутствия искажений и проведения обработки в реальном времени независимо от степени насыщенности изображений. В связи с этим *цель исследований* заключается в разработке метода кодирования вектора двухкомпонентных кортежей линейаризированных трансформант.

2. Основная часть

Построение кодового представления вектора p двухкомпонентных кортежей необходимо осуществлять с учетом следующих особенностей:

- 1) кортеж $\{\ell_\alpha; c_\alpha\}$ формируется из двух компонент, где первая компонента ℓ_α – длина цепочки нулевых компонент, а вторая c_α – значение компоненты, отличное от нулевого;
- 2) в направлении строк такой массив представляет собой структурные элементы трансформанты, имеющие неоднородные свойства, а в направлении столбцов – однородные по структурному формированию количественные параметры линейаризированной трансформанты;
- 3) компоненты кортежа независимо друг от друга принимают значения соответственно в пределах следующих динамических диапазонов:

$$1 \leq \ell_\alpha \leq \lambda(\ell) = \max_{2 \leq \alpha \leq n_{\text{крт}} - 1} \{\ell_\alpha\};$$

$$1 \leq c_\alpha \leq \lambda(c) = \max_{2 \leq \alpha \leq n_{\text{крт}} - 1} \{c_\alpha\}; \quad \alpha = \overline{2, n_{\text{крт}} - 1};$$

4) обработке подвергается не весь вектор ДК, а только та его часть P' , которая не содержит первый и последний кортежи, т.е.

$$P' = \{(\ell_2; c_2), \dots, (\ell_\alpha; c_\alpha), \dots, (\ell_{n_{\text{крт}}-1}; c_{n_{\text{крт}}-1})\}.$$

В результате этого усеченный вектор P' двухкомпонентных кортежей представляет собой массив размерностью $2 \times (n_{\text{крт}} - 2)$. При этом длина $n_{\text{крт}}$ вектора двухкомпонентных кортежей не известна заранее, так как зависит от количества и длин цепочек нулевых компонент трансформанты ДКП.

Двухкомпонентный кортеж $\Theta_\alpha^{(2)}$ в соответствии с комбинаторной интерпретацией, задаваемой первыми вторым свойствами, является перестановкой с повторениями, на элементы которой наложены ограничения на динамический диапазон, равные $\lambda(\ell)$ и $\lambda(c)$. В то же время такие последовательности являются двухосновными позиционными числами, или биадическими числами.

Определение 1. Двухкомпонентный кортеж, компоненты которого удовлетворяют свойствам 1 и 2, называется *двухэлементным биадическим числом*.

В качестве старшего элемента $\theta_{1,\alpha}$ рассматривается первая компонента кортежа, а именно длина ℓ_α цепочки нулевых компонент. Соответственно младшим элементом $\theta_{2,\alpha}$ является вторая компонента кортежа, т.е. значимая компонента c_α линеаризированной трансформанты.

Для каждого кортежа $\Theta_\alpha^{(2)}$ как двухэлементного биадического числа можно сформировать кодовое значение $E(\Theta_\alpha^{(2)})$, причем согласно свойству двухосновных позиционных чисел значение кода $E(\Theta_\alpha^{(2)})$ будет ограничено сверху величиной, равной произведению оснований $\lambda(\ell) \cdot \lambda(c)$, т.е. $E(\tilde{\Theta}_\alpha^{(2)}) < \lambda(\ell) \cdot \lambda(c)$.

При этом, поскольку величины $\lambda(\ell)$ и $\lambda(c)$ являются фиксированными в пределах обрабатываемого вектора ДК, такое ограничение будет соответствовать всем кодам, полученным для двухкомпонентных кортежей текущей линеаризированной трансформанты. Это задается следующим выражением:

$$E(\Theta_\alpha^{(2)}) < \lambda(\ell) \cdot \lambda(c) \text{ для } \alpha = \overline{2, n_{\text{крт}} - 1}. \quad (1)$$

Следовательно, формируется последовательность A :

$$A = \{E(\Theta_2^{(2)}); \dots; E(\Theta_\alpha^{(2)}); \dots; E(\Theta_{n_{\text{крт}}-1}^{(2)})\},$$

составленная из величин $E(\Theta_\alpha^{(2)})$, для которых выполняется ограничение (1). Последовательность A с такими свойствами является позиционным числом с основанием $\lambda(\ell) \cdot \lambda(c)$.

Поскольку элементы $E(\Theta_\alpha^{(2)})$ в свою очередь являются кодами биадических чисел $\Theta_\alpha^{(2)}$, то составленные из них позиционные числа A будем называть *укрупненными позиционными числами*.

В то же время, в соответствии с четвертым свойством длина укрупненного позиционного числа заранее не известна, т.е. $n_{\text{крт}} = \text{var}$. В связи с этим, сформулируем следующее определение.

Определение 2. Позиционное число A , количество элементов которого заранее не известно, а сами элементы в свою очередь являются кодами $E(\Theta_\alpha^{(2)})$ двухэлементных биадических чисел $\Theta_\alpha^{(2)}$ и удовлетворяют ограничению (1), называется *укрупненным позиционным числом (УПЧ) с неопределенной длиной (НД)*.

Для учета третьего свойства предлагается понижать динамический диапазон компонент кортежа до нулевого уровня. Вводятся величины ℓ'_α и c'_α , равные соответственно: $\ell'_\alpha = \ell_\alpha - 1$; $c'_\alpha = c_\alpha - 1$.

В результате компоненты будут принимать значения в следующих диапазонах:

$$0 \leq \ell'_\alpha \leq \lambda(\ell) - 1, \alpha = \overline{2, n_{\text{крт}} - 1}; \quad (2)$$

$$0 \leq c'_\alpha \leq \lambda(c) - 1, \alpha = \overline{2, n_{\text{крт}} - 1}. \quad (3)$$

Для получения кода соответствующего укрупненного неопределенной длины позиционного числа, составленного из перетрансформированных ДК сформулируем и докажем следующую теорему.

Теорема о кодировании укрупненного неопределенной длины позиционного числа. Значение кода $E(P')$ для усеченного вектора P' двухкомпонентных кортежей, размерностью $2 \times (n_{\text{крт}} - 2)$, как комбинаторного объекта, а именно в направлении строк – структурные элементы трансформанты, имеющие неоднородные свойства с основаниями $\lambda(\ell)$ и $\lambda(c)$, а в направлении столбцов – однородные по структурному формированию количественные параметры линеаризированной трансформанты, определяется на основе соотношения

$$E(P') = \sum_{\alpha=2}^{n_{\text{крт}}-1} (\ell'_\alpha \lambda(c) + c'_\alpha) \cdot (\lambda(\ell) \cdot \lambda(c))^{n_{\text{крт}} - \alpha}. \quad (4)$$

Здесь $(n_{\text{крт}} - 2)$ – длина усеченного вектора двухкомпонентных кортежей; $\lambda(\ell)$ и $\lambda(c)$ – соответственно основания компонент векторов длин цепочек нулевых и значимых компонент.

Доказательство. В соответствии с комбинаторной интерпретацией двухкомпонентный кортеж $\Theta_\alpha^{(2)}$ является двухэлементным биадическим числом с основаниями, равными $\lambda(\ell)$ и $\lambda(c)$. Старшим элементом является первая компонента $\theta_{1,\alpha}$ кортежа (длина ℓ_α цепочки нулевых компонент), а младшим элементом

является вторая компонента $\theta_{2,\alpha}$ кортежа (значимая компонента c_α). Тогда значение кода $E(\Theta_\alpha^{(2)})$ для двухэлементного биадического числа $\Theta_\alpha^{(2)}$ будет определяться по формуле

$$E(\Theta_\alpha^{(2)}) = (\ell_\alpha \lambda(c) + c_\alpha). \quad (5)$$

Согласно определению 2 формируемая на основе значений кодов $E(\Theta_\alpha^{(2)})$ последовательность A , $A = \{E(\Theta_2^{(2)}); \dots; E(\Theta_\alpha^{(2)}); \dots; E(\Theta_{n_{\text{крт}}-1}^{(2)})\}$ является укрупненным позиционным числом с основанием, равным $\lambda(\ell) \cdot \lambda(c)$.

Тогда допустимое количество $W(A^{(\alpha)})$ укрупненных позиционных чисел, соответствующее подпоследовательности $A^{(\alpha)}$, составленной из кодов $E(\Theta_\gamma^{(2)})$, младших относительно α -го кода, т.е. $\gamma = \alpha + 1, n_{\text{крт}} - 1$, $A^{(\alpha)} = \{E(\Theta_{\alpha+1}^{(2)}); \dots; E(\Theta_{n_{\text{крт}}-1}^{(2)})\}$, будет определяться как накопленное произведение оснований младших элементов УПЧ. Это задается следующей формулой:

$$W(A^{(\alpha)}) = (\lambda(\ell) \cdot \lambda(c))^{n_{\text{крт}} - \alpha}.$$

С учетом этого значение кода $E(A)$ укрупненного позиционного числа A , элементы которого имеют основания, равные $\lambda(\ell) \cdot \lambda(c)$, будет вычисляться по следующей формуле:

$$E(A) = E(P') = \sum_{\alpha=2}^{n_{\text{крт}}-1} E(\Theta_\alpha^{(2)}) W(A^{(\alpha)}).$$

Расписав в полученном выражении значения кода $E(\Theta_\alpha^{(2)})$ для биадического числа и весового коэффициента $W(A^{(\alpha)})$, получим

$$E(A) = \sum_{\alpha=2}^{n_{\text{крт}}-1} (\ell_\alpha \lambda(c) + c_\alpha) \cdot (\lambda(\ell) \cdot \lambda(c))^{n_{\text{крт}} - \alpha}. \quad (6)$$

В формуле (6) величина $W(A^{(\alpha)})$ выступает как весовой коэффициент α -го элемента укрупненного позиционного числа (рисунок).

Полученное соотношение позволяет вычислить код $E(A)$ для укрупненного позиционного числа A . В то же время число A формируется как двухуровневое позиционное описание усеченного вектора двухкомпонентных кортежей. Поэтому значение кода для УПЧ является кодовым представлением вектора P' , т.е. $E(A) = E(P')$. Теорема доказана.

Из теоремы следует, что кодирование усеченного вектора двухкомпонентных кортежей осуществляется по двухуровневой схеме (см. рисунок). На первом уровне формируется кодовое представление для отдельных двухкомпонентных кортежей $\Theta_\alpha^{(2)}$. Соответственно на втором уровне осуществ-

ляется формирование общего кодового представления для полученных на первом уровне кодов.

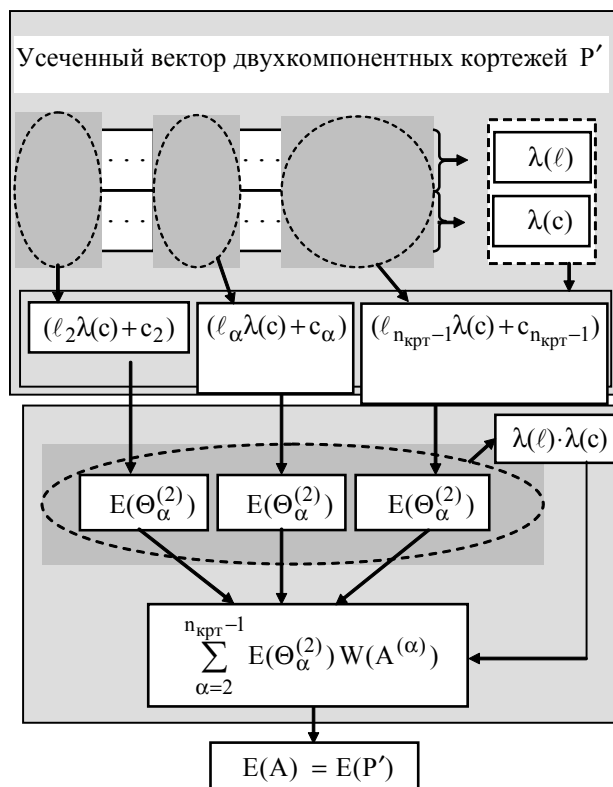


Схема двухуровневого кодирования вектора двухкомпонентных кортежей

В таком случае структура кодограммы будет состоять из двух частей, включая служебную и информационную части.

Информационная часть кодограммы включает в себя кодовое представление значения кода $E(P')$ усеченного вектора двухкомпонентных кортежей. Служебная часть содержит основания компонент кортежа.

На основе изложенного материала можно заключить следующее:

– обоснована интерпретация усеченного вектора двухкомпонентных кортежей как укрупненных позиционных чисел, элементами которого являются кодовые значения отдельных кортежей, рассматриваемых как двухэлементное биадическое число;

– в результате доказательства теоремы получено выражение для определения кода укрупненного позиционного числа с использованием двухуровневой схемы. Кодирование проводится без потери информации, с учетом особенностей двухкомпонентных кортежей, а именно понижения динамического диапазона относительно нулевого уровня.

3. Выводы

1. Обоснована интерпретация усеченного вектора двухкомпонентных кортежей как укрупненного позиционного числа неопределенной длины, элементами которого являются коды двухэлементных биадических чисел, образованных для отдельных ДК.

2. В результате доказанной теоремы получено кодообразующее соотношение, обеспечивающее формирование кода для укрупненного позиционного числа с неопределенной длиной по двухуровневой схем, а именно на первом уровне формируется кодовое представление для отдельных двухкомпонентных кортежей, а на втором – осуществляется формирование общего кодового представления для кодов, полученных на первом уровне.

Научная новизна. Впервые получено кодообразующее соотношение для компактного представления усеченного вектора двухкомпонентных кортежей как комбинаторного объекта. Отличие заключается в том, что кодовое значение формируется по двухуровневой схеме для укрупненного позиционного числа с неопределенной длиной, элементами которого являются коды биадических чисел, образованных для двухкомпонентных кортежей. Это позволяет сформировать без поте-

ри информации компактное представление для линеаризированной трансформанты.

Литература: 1. *Олифер В.Г.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. СПб.: Питер, 2006. 958 с. 2. *Gonzales R.C.* Digital image processing / R.C. Gonzales, R.E. Woods. Prentice Inc. Upper Saddle River, New Jersey 2002. 779 p. 3. *Баранник В.В.* Кодирование трансформированных изображений в инфокоммуникационных системах / В.В. Баранник, В.П. Поляков. Х.: ХУПС, 2010. 212 с. 4. *Баранник В.В.* Обоснование проблемных недостатков технологии компонентного кодирования трансформированных изображений для средств телекоммуникаций / В.В. Баранник, Ю.В. Стасев, С.В. Туренко // Сучасна спеціальна техніка. 2013. №4. С. 22 – 27.

Поступила в редколлегию 05.01.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Баранник В.В.

Туренко Сергей Викторович, аспирант ХНУРЭ. Научные интересы: обработка и передача информации. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Ленина, 14.

УДК004.45

СИСТЕМИ ОБ'ЄКТНО-РЕЛЯЦІЙНОЇ ПРОЕКЦІЇ ДЛЯ C++

БОНДАРЕНКО М.А., МАКАРЕНКО А.Ю.

Узагальнюється теоретична інформація в галузі проектування систем об'єктно-реляційної проекції, визначаються ключові технічні вимоги для проектування ORM-систем, аналізуються механізми проекції та інтерфейси існуючих ORM-систем.

1. Вступ

Найбільш поширеним способом зберігання та первинної обробки інформації є використання реляційних баз даних, тоді як об'єктно-орієнтоване програмування є на сьогодні основною технологією розробки програмного забезпечення. Ключовим елементом реляційних баз даних є таблиця, звернення до якої відбувається шляхом формування запитів мовою, яку підтримує система керування базами даних (СКБД). Основною одиницею об'єктно-орієнтованого програмування є клас, який описується в рамках, встановлених синтаксисом мови програмування. В пошуку оптимізації шляхів роботи з даними при розробці програмного забезпечення об'єктно-орієнтованої системи програмування працюють нові інструменти: об'єктно-реляційні СКБД, об'єктно-орієнтовані бази даних та системи об'єктно-реляційної проекції. Проблема даного дослідження полягає у протиріччі між відомими перевагами систем об'єктно-реляційної проекції та низьким рівнем використання цих систем при розробці програмного забезпечення мовою C++.

2. Основний зміст

У рамках зазначеної проблеми мають бути виконані такі завдання: аналіз теоретичних питань в галузі об'єктно-реляційної проекції; введення ключової термінології; роль систем об'єктно-реляційної проекції в архітектурі програмного засобу; перелік інструментів для розробки системи; відповідність до цих вимог

мови програмування C++; підхід до реалізації механізмів рефлексії; введення інструментів об'єктно-реляційної проекції для C++. Об'єктно-реляційна проекція (Object-relational mapping- ORM) це програмна технологія, яка пов'язує реляційні бази даних з концепціями об'єктно-орієнтованого програмування шляхом створення віртуальних об'єктних баз даних. Дана технологія може бути введена як програмний компонент (динамічна або статична бібліотека), а також у вигляді окремої розробки програми. ORM-технологія втілює в собі основні принципи концепції RAD (Rapid application development - швидка розробка програмного забезпечення). Це визначає її як інструмент для прискорення розробки ПЗ, підвищення якості роботи, надійності програмного продукту та зниження собівартості його розробки [1]. Для подальшого дослідження необхідно визначити ключову термінологію [2] системи об'єктно-реляційної проекції, а саме: проекція, проектувати, атрибут, проекція атрибуту, проекція зв'язку.

Проекція – зв'язок між об'єктами, співвідношенням об'єктів, які зберігаються в реляційних сховищах даних. Проектувати – визначати об'єкти, їх атрибути та взаємозв'язки з іншими об'єктами, що зберігаються в постійному сховищі даних. Атрибут – загальнодоступний член класу, або значення особистого члена класу, який повертається у разі виклику методу класу. Він співвідноситься зі стовпцем реляційної таблиці.

Проекція атрибута описує метод зберігання значення атрибута об'єкта в реляційному сховищі. Проекція зв'язку - опис методу його збереження (асоціація, агрегація або композиція) між об'єктами. Архітектурна роль об'єктно-реляційної проекції в програмному засобі полягає у проекції компонентів бізнес-логіки. Вона представлена конкретними класами на відповідні об'єкти реляційної бази даних [3]. Порівняння узагальненої архітектури ПЗ з її використанням наведено на рисунку. Пунктирною лінією виділені компоненти системи, які мають бути розроблені самостійно. Система об'єктно-реляційної проекції включає в себе

вбудований інтерфейс доступу до даних. Вона оптимізує час розгортання системи та проектування бізнес-логіки. При цьому ліквідується необхідність розробки компонентів доступу до даних (Data access logic components – DALC).

Технологія об'єктно-реляційної проекції реалізована для використання з переважною більшістю мов програмування у формі окремих бібліотек. Вона реалізована у складі багатофункціональних фреймворків як частина шаблону проектування модель-вид-контролер (MVC). В шаблоні MVC об'єктно-реляційна проекція застосовується для опису моделі даних [4]. Ключовою вимогою до мови програмування для побудови системи об'єктно-реляційної проекції є можливість рефлексивного програмування [5]. Результати узагальненого аналізу підходів до організації рефлексії для мови програмування C++ наведено в таблиці.

Існують такі реалізації механізму рефлексії для мови програмування C++: C++/CLI корпорації Microsoft; бібліотека Mirror; Qt Framework. Мета-об'єкти Qt додають нові члени класу до часу виконання програми. Для реалізації проекції виконується мета-об'єктний компілятор, який є надбудовою компілятора C++.

Розглянемо існуючі реалізації систем об'єктно-реляційної проекції для C++ для розробки ORM-систем, перевірки відповідності архітектури інтерфейсу користувача вимогам об'єктно-орієнтованого програмування. SQLite - бібліотека кросплатформи з відкритим кодом, яка реалізує механізм об'єктно-реляційної проекції. Вона дає можливість створювати таблиці, модифікувати структуру бази даних, підтримує проекцію атрибутів та зв'язків. Механізм проекції повністю реалізується за допомогою XML розмітки без побудови C++ класу. Класи C++ генеруються шляхом використання утиліти кодогенерації lightsql-gen, яка входить в комплект поставки бібліотеки. Розглянемо приклад проекції об'єкта засобами бібліотеки SQLite:

```
<?xml version="1.0"?>
```

```
<!DOCTYPE database SYSTEM "litesql.dtd">
```

```
<database name="ExampleDatabase" namespace="example">
  <object name="Person">
    <field name="name" type="string"/>
    <field name="age" type="integer" default="15"/>
    <field name="sex" type="integer">
      <value name="Male" value="0"/>
      <value name="Female" value="1"/>
    </field>
    <method name="sayHello"/>
  </object>
  <relation id="Mother" unidir="true">
    <relate object="Person" limit="many" handle="mother"/>
    <relate object="Person" limit="one"/>
  </relation>
  <relation id="Children" unidir="true">
    <relate object="Person" handle="children"/>
    <relate object="Person"/>
  </relation>
</database>
```

В результаті кодогенерації створюється клас Person, який має відкриті члени класу- атрибути проекції. Розглянемо приклад використання об'єктів згенерованого класу Person:

```
ExampleDatabase db("sqlite3", "database=example.db");
db.verbose = true;
db.create();
db.begin();
Person jeff(db);
jeff.name = "Jeff";
jeff.sex = Person::Sex::Male;
jeff.age = 32;
jeff.update();
Person jill(db);
```

Стандартна схема побудови програмного забезпечення



Схема побудови ПЗ з використанням ORM



Архітектура ПЗ збереження даних в реляційному сховищі

```
jill.name="Jill";
jill.sex=Person::Sex::Female;
jill.age=33;
jill.update();
jeff.children().link(jack);
```

Виборки здійснюються за допомогою визначеного шаблонного об'єкта `select` або `sqlquery`:

```
try {
select<Person>(db, Person::Id == 100).one();
} catch (NotFound e) {
cout << "No Person with id 100" << endl;
}
```

Реалізація проєкції бібліотеки `LightSQL` обмежує стандартні можливості мови проєктування класів через використання механізму кодогенерації класів.

ODB (Object data base- об'єктна база даних) - бібліотека C++, яка реалізує систему об'єктно-орієнтованої проєкції та використовує компілятор `GCC` (GNU Compiler Collection- набір компіляторів GNU). Проєкція класу досягається директивою компіляції, яка додає до класу необхідну метаінформацію. Розглянемо код проєкції з використанням засобів бібліотеки ODB:

```
#pragma db object table("people")
class person
{
private:
```

```
friend class odb::access;
person ();

#pragma db id auto
unsigned long id_;

string first_;
string last_;

#pragma type("INT UNSIGNED")
unsigned short age_;
};
```

Для організації виборки застосовується шаблонний метод об'єкта `Database`, який є інтерфейсом доступу до реляційної бази даних. Для зберігання об'єктів використовується шаблонний об'єкт `result` (результат) стандартної бібліотеки C++. Для формування умов виборки існує шаблонний об'єкт `query` (запит). Розглянемо програмний код механізму виборки в бібліотеці ODB:

```
typedef odb::query<person> query;
typedef odb::result<person> result;
transaction t (db.begin ());
result r (db.query<person> (query::last == "Doe" && query::age < 30));
for (result::iterator i (r.begin ()); i != r.end (); ++i)
```

Аналіз підходів до реалізації механізму рефлексії мови програмування C++

Підхід	Переваги	Недоліки
Аналіз інформації для відладки.	Використання стандартного методу опису класу. Можливість отримати повну інформацію про типи даних.	Необхідність побудови програми в режимі відладки. Залежить від компілятора.
Препроцесор аналізу та опису класу.	Використання стандартного методу опису класу.	Специфіка роботи компіляторів з членами класу та таблицями віртуальних функцій. Розробка аналізатора коду C++.
Модифікований компілятор з підтримкою рефлексії.	Відсутність додаткових етапів побудови програми. Генерація ефективного коду для засобів рефлексії.	Відтворення та адаптація програмної інфраструктури.
Ручне формування мета-опису класу засобами мови програмування.	Незалежність від компілятора. Проста реалізація.	Написання додаткового програмного коду, для опису метаінформації. Людський фактор.
Формування мета-опису класу в конфігурації зовнішніх класів.	Використання стандартного методу опису класу. Можливість використання стандартних засобів опису структур даних (XML, JSON).	Додаткові часові та ресурсні видатки на отримання метаінформації.
Формування мета-опису класу засобами скриптової мови програмування.	Використання вбудованих можливостей скриптових мов програмування.	Часові та ресурсні витрати на запуск та роботу з інтерпретатором скриптової мови програмування.

```

{
    cout << "Hello, " << i->first () << endl;
}

t.commit ();

```

Wt::Dbo (Web toolkit - Data base object, набір інструментів для веб-розробки — об'єктна база даних) - бібліотека реалізації інструментів об'єктно-реляційної проекції. Для проекції атрибутів та зв'язків бібліотека пропонує задавати програмісту метайнформацію вручну. Це імітує рефлексію класу. Кожен об'єкт для проектування має реалізувати шаблонний метод persist (зберігати), в якому описується структура відповідного об'єкта реляційної бази даних. Розглянемо приклад проекції класу:

```

#include <Wt/Dbo/Dbo>
#include <string>
namespace dbo = Wt::Dbo;
class User {
public:
    enum Role {
        Visitor = 0,
        Admin = 1,
        Alien = 42
    };
    std::string name;
    std::string password;
    Role role;
    int karma;

    template<class Action>
    void persist(Action& a)
    {
        dbo::field(a, name, "name");
        dbo::field(a, password, "password");
        dbo::field(a, role, "role");
        dbo::field(a, karma, "karma");
    }
};

```

Звернення до реляційної бази даних та реєстрація нових об'єктів відбувається за допомогою об'єкта класу Session (сесія). Він здійснює з'єднання з базою даних та представляє інтерфейс для маніпуляції об'єктами та записами в базі даних:

```

dbo::ptr<User> joe = session.find<User>().where("name = ?").bind("Joe");

```

QxOrm (Qx object relation mapping- об'єктно-реляційна проекція) - бібліотека, спроектована для надання програмістам можливостей роботи з об'єктно-реляційною проекцією. Вона має зовнішню залежність від boost та Qt Framework. Проекція класу відбувається за принципом

ручного додавання метайнформації. Інтерфейс роботи з реляційним сховищем не є об'єктно-орієнтованим. Він зроблений у вигляді функцій, кожна з яких виконує одну конкретну операцію. Аналіз існуючих ORM-систем показує, що найбільш розповсюдженим методом для організації проекції є рефлексія ручного додавання метайнформації в клас проекції. ORM-бібліотеки надають програмісту неповноцінний об'єктно-орієнтований інтерфейс. Об'єкти проекції активно використовують шаблони статичного поліморфізму без прийомів спадкування та динамічного поліморфізму.

Висновки

Наукова новизна. Виконано теоретичний аналіз аспектів проектування архітектури ORM-системи та дизайну інтерфейсу користувача. Показано, що ORM-системи програмного засобу заміщують компоненти логіки доступу до даних. Введено терміни об'єктно-реляційної проекції: проекція, проектувати, атрибута, проекція атрибуту, проекція зв'язку. Механізм рефлексії є ключовою технічною вимогою до мови програмування для організації проекції реляційної таблиці на клас. Стандарт мови C++ частково реалізує механізм інтроспекції типів даних — можливості доступу об'єкта до структури свого класу у час виконання. Показано, що загальними підходами для реалізації механізму рефлексії для C++ є аналіз інформації для відладки, створення препроцесора, модифікація компілятора, ручне формування мета-опису класу. ORM-системи для C++ відходять від об'єктно-орієнтованої концепції побудови програмних інтерфейсів.

Література: 1. Coleman G., Verbruggen R. A Quality Software Process for Rapid Application Development // Software Quality Control. 1998. Vol. 7, № 2. P. 107–122. 2. Van Zyl P., Kourie D. G., Boake A. Comparing the performance of object databases and ORM tools // Proc. of the 2006 annual research conference of the South African institute of computer scientists and information technologists on IT research in developing countries. Republic of South Africa: South African Institute for Computer Scientists and Information Technologists, 2006. P. 1–11. 3. Van Zyl P. et al. The influence of optimisations on the performance of an object relational mapping tool // Proceedings of the 2009 Annual Research Conference of the South African Institute of Computer Scientists and Information Technologists. New York, NY, USA: ACM, 2009. P. 150–159. 4. Ireland C. et al. A Classification of Object-Relational Impedance Mismatch // First International Conference on Advances in Databases, Knowledge, and Data Applications, 2009. DBKDA '09. 2009. P. 36–43. 5. Smith B.C. Procedural reflection in programming languages: Thesis. Massachusetts Institute of Technology, 1982.

Надійшла до редакції 22.08.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Кривуля Г.Ф.

Бондаренко Микола Андрійович, канд. техн. наук, професор Української інженерно-педагогічної академії. Наукові інтереси: інформаційні технології та проектування технічних систем. Адреса: Україна, 61000, Харків, вул. Ключківська, 195 г, кв. 44, тел. 7 19 50 01.

Макаренко Антон Юрійович, асистент кафедри електроніки та комп'ютерних технологій систем управління навчально-наукового професійно-педагогічного інституту Української інженерно-педагогічної академії. Адреса: Україна, Артемівськ, вул. Носакова, 9.



МЕТОД КОМПАРАТОРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ В СИСТЕМІ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

КОЗУЛЯ Т.В., БІЛОВА М.О.

Обґрунтовується методичне забезпечення відповідності вимогам екологічності системних об'єктів за концепцією сталого розвитку і аналізуються отримані результати з його реалізації. Розглядається практичне застосування методу компараторної ідентифікації рівня екологічної якості на регіональному рівні дослідження соціально-еколого-економічних систем.

Вступ

Сучасна екологічна ситуація потребує зміни традиційних підходів – переходу від контролюючої діяльності до регулюючих методів, які б дозволили порівнювати між собою різні фактори впливу на навколишнє середовище (НС), узгоджувати соціально-еколого-економічні інтереси з забезпеченням балансу між екологією та соціально-економічною сферою.

Для розв'язання задачі оцінки якості НС доцільним є звернення до сучасних розробок в галузі інтелектуальних моделей, які б поєднували функції узагальненої корисності з оцінкою альтернатив розв'язання задачі структурної і параметричної ідентифікації.

Незважаючи на те, що на сьогодні запропоновано і розроблено безліч різноманітних комплексних показників якісного екологічно безпечного функціонування навколишнього природного середовища, актуальність таких робіт не втрачає вагомості за умови реалізації концепції сталого розвитку, суть якої полягає у поєднанні та узгодженості в екологічній оцінці економічного, екологічного та людського розвитку при відсутності зниження якості і безпеки життя людей, збереження природного стану НС й соціального прогресу [1, 2].

Системне узгодження та збалансування цих трьох складових пов'язано з узгодженістю оцінки відповідності розвитку окремої системи вимогам екологічної якості і безпеки. Взаємозв'язок природоохоронної та економічної складових потребує вартісної оцінки техногенних впливів на навколишнє середовище. Індикатором екологічного розвитку соціальної системи вважається передусім рівень здоров'я населення [1].

Таким чином, важливою проблемою на шляху втілення концепції сталого розвитку є формування системи вимірів для кількісного і якісного оцінювання відповідності вимогам екологічності систем. Головними вимогами до зазначеної системи вимірів є інформаційна «повнота» і адекватність представлення взаємопов'язаної тріади складових сталого розвитку.

На даний момент різномірні системи прийнято оцінювати індексами: система задається у вигляді детермінованого набору показників у кожному блоці, які шляхом математичних обчислень зводяться у три індекси. Індекс сталого розвитку прийнято визначати як суму індексів розвитку економічної, соціальної та екологічної сфер з певними ваговими коефіцієнтами, тобто як деяку адитивну оцінку [1]. Адитивні моделі такого виду орієнтовані на оцінювання явних (прямих) властивостей системи, рівень яких безпосередньо, як сума, визначається властивостями елементів, що утворюють систему. Однак система характеризується емерджентністю як системною властивістю, що не зводиться до простої суми властивостей її елементів, а визначає її як цілісність. Враховуючи вказане вище, дати оцінку таким системам достатньо складно, а тому необхідно створити методику з визначення природи зв'язків між станами, в яких може знаходитись система, та оцінити ці зв'язки.

1. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є обґрунтування нового підходу до визначення екологічної оцінки стану системних об'єктів для підвищення об'єктивності, зниження системності та покращення ефективності прийняття рішень з використанням методу компараторної ідентифікації в багатофакторному аналізі. Відповідно до цілі дослідження поставлені такі задачі:

- 1) надати зміст запропонованих методик оцінки екологічної якості складних систем за концепцією сталого розвитку при використанні основ теорії компараторної ідентифікації;
- 2) розробити алгоритмічне забезпечення реалізації методик оцінки екологічності соціально-еколого-економічних систем;
- 3) проаналізувати практичні результати розрахунків за методиками і визначити ефективність запровадження компараторної ідентифікації для системи оцінювання стану складних екологічних систем.

2. Методика дослідження і аналіз результатів

В рамках теорії компараторної ідентифікації розглядаються завдання математичного опису сенсорних систем, структурної ідентифікації невідомого оператора та визначення його параметрів, що може бути використано для визначення оцінки якості складних систем – еколого-економічної, соціально-економічної, еколого-соціальної і соціально-еколого-економічної, при дослідженнях за концепцією сталого розвитку [2].

Нехай існує деяка сукупність об'єктів $X_0, X_1, X_2, \dots, X_n$ загальною кількістю n , кожен з яких характеризується

ся m певних параметрів та знаходиться у деякому початковому стані S :

$$X_0(x_{00}, x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0m}), S_0;$$

$$X_1(x_{10}, x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1m}), S_1;$$

$$X_2(x_{20}, x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2m}), S_2;$$

...

$$X_n(x_{n0}, x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nm}), S_n;$$

$$i = \overline{1; n}, j = \overline{1; m}.$$

Постає питання пошуку нового підходу, що дозволив би визначати об'єкт, який максимально відповідає потребам суспільства, а також його структурну здатність приводити до виникнення процесу, який спричиняє перехід системи у новий екологічно відповідний стан S_1 або збереження її стану на деякий час S'_0 з переходом до нового стану (рис. 1).

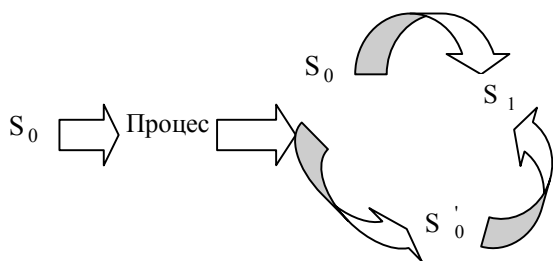


Рис. 1. Схема екологічної відповідності розвитку систем

Для методу компараторної ідентифікації характерною є методика порівняння заданого результату вимірювання з еталоном за певною шкалою. Ми пропонуємо розробити таку шкалу для кожного окремого випадку – для фіксованого j обирається одне еталонне значення параметра y_j , яке буде мінімальним або максимальним значенням параметра x_{ij} серед усіх X_n залежно від фізичного змісту кожного з параметрів. Загальна кількість еталонних значень буде складати m .

Оскільки фізичний зміст параметрів є різним, то необхідним є їх нормування, що полягає у порівнянні розглянутої встановленої властивості системи x_{ij} з її еталонним значенням y_j і знаходженні частки:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{y_j}. \quad (1)$$

Надалі пропонується три варіанти отриманого відношення, що характеризує стан системи: $n_{ij} = 1$ – оптимальний, $n_{ij} \gg 1$ та $n_{ij} \ll 1$ – незадовільний, який свідчить про високий рівень відхилення від відповідності вимогам екологічного розвитку.

З метою встановлення міри відповідності запропоновано визначення відхилення від еталонного значення, прийнятого на одиницю, у вигляді:

$$\Delta_{ij} = \frac{|n_{ij} - 1|}{\max n_j - \min n_j}. \quad (2)$$

Оптимальним слід вважати значення $\Delta_{ij} = 0$, однак допустимим буде відхилення на 20% [3], а тому на даному етапі еталонними значеннями будуть $\Delta_{ij} \in [0; 0.2]$.

Для вибору екологічно відповідного рівня за станом з досліджених об'єктів запропоновано використати метод компараторної ідентифікації: усі значення Δ_{ij} проходять через найпростіший компаратор, що має один вхід і один вихід. Якщо значення Δ_{ij} , що поступає на вхід компаратора, входить в проміжок $[0; 0.2]$, відповідь на виході компаратора буде ТАК, тобто 1. В іншому випадку на виході компаратора буде НІ, тобто 0 [4].

Таким чином, кожен з об'єктів X_i буде характеризуватись множиною k_{im} , де кожне k_{ij} дорівнює 0 або 1. На наступному кроці використовується компаратор більш складного виду (рис. 2): він має m входів та 1 вихід. Такий компаратор застосовується для кожного X_i : на вхід подаються відповідні значення k_{ij} і, якщо всі вони дорівнюють 1 – на виході буде значення ТАК. Такий об'єкт є «нормальним» – він не потребує внесення коректив в управління. Однак, якщо хоч один з k_{ij} дорівнює 0 – об'єкт потребує регулюючих змін для отримання початкових параметрів або за рахунок управляючих дій необхідно покращити екологічні відповідності вимогам соціально-екологічної безпеки [3, 4].

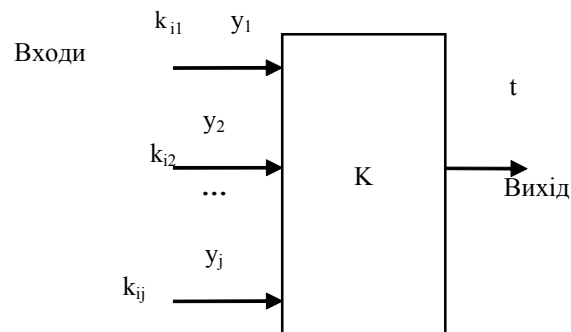


Рис. 2. Схема компаратора

Запропоновану методику оцінки екологічної відповідності можна використовувати у випадках, коли потрібно визначити рейтинг об'єктів за їх станом. На перше місце рейтингу пропонується розмістити об'єкт, для якого найбільша кількість характеристик k_{ij} приймає значення 1. Надалі пропонується сформулювати нову вибірку об'єктів, яка більше не буде включати в себе названий об'єкт. Розрахунки проводяться заново, починаючи з пошуку еталонних значень параметрів y_j . За тим же принципом обирається об'єкт, який займає друге місце рейтингу. Формується оновлена вибірка. Таким чином, розрахунки проводяться до моменту повного розміщення розглянутих об'єктів у певній послідовності за значеннями екологічних відхилень (рис. 3).

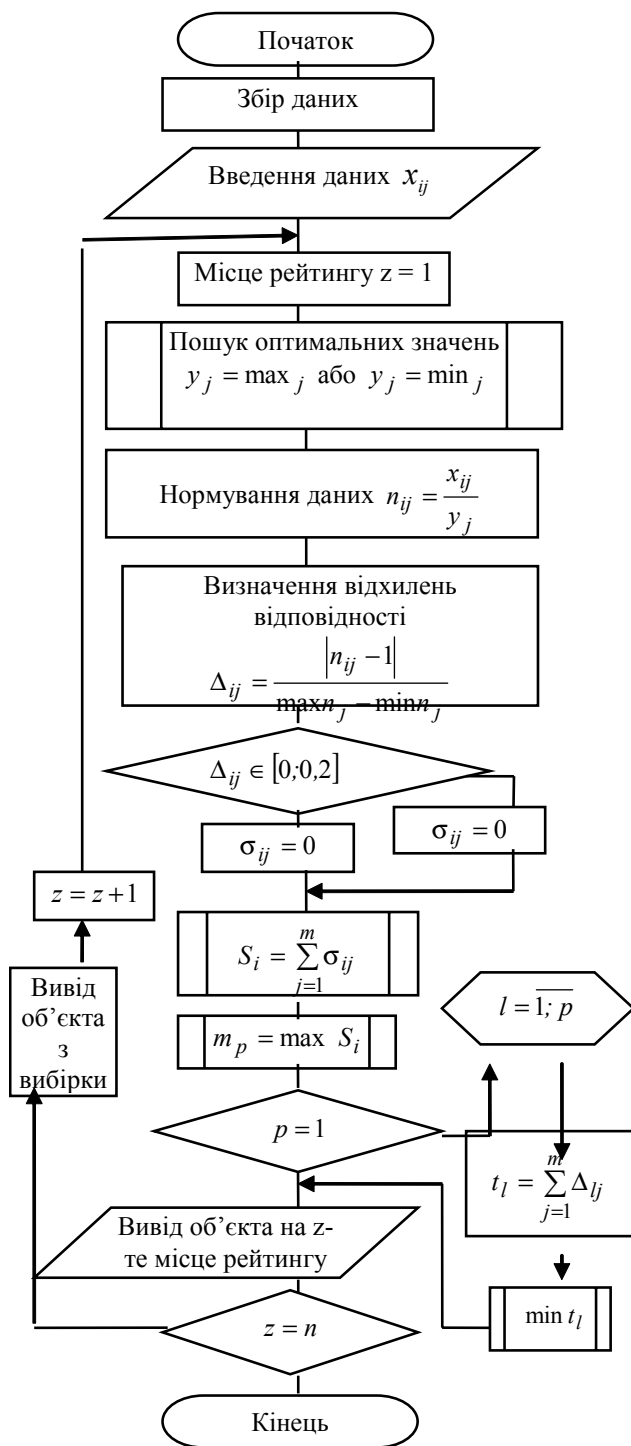


Рис. 3. Схема алгоритму методики I

Для перевірки отриманих результатів була використана методика II, відповідно до умов якої при формуванні рейтингу враховується загальна сума відхилень параметрів кожного окремого об'єкта від норми. Перше місце рейтингу визначено мінімальною сумою відхилень параметрів Δ_{ij} .

Поступове видалення з вибірки об'єктів за збільшенням суми відхилень дозволяє отримати повний рейтинг об'єктів від найкращого до найгіршого екологічного стану (рис. 4).

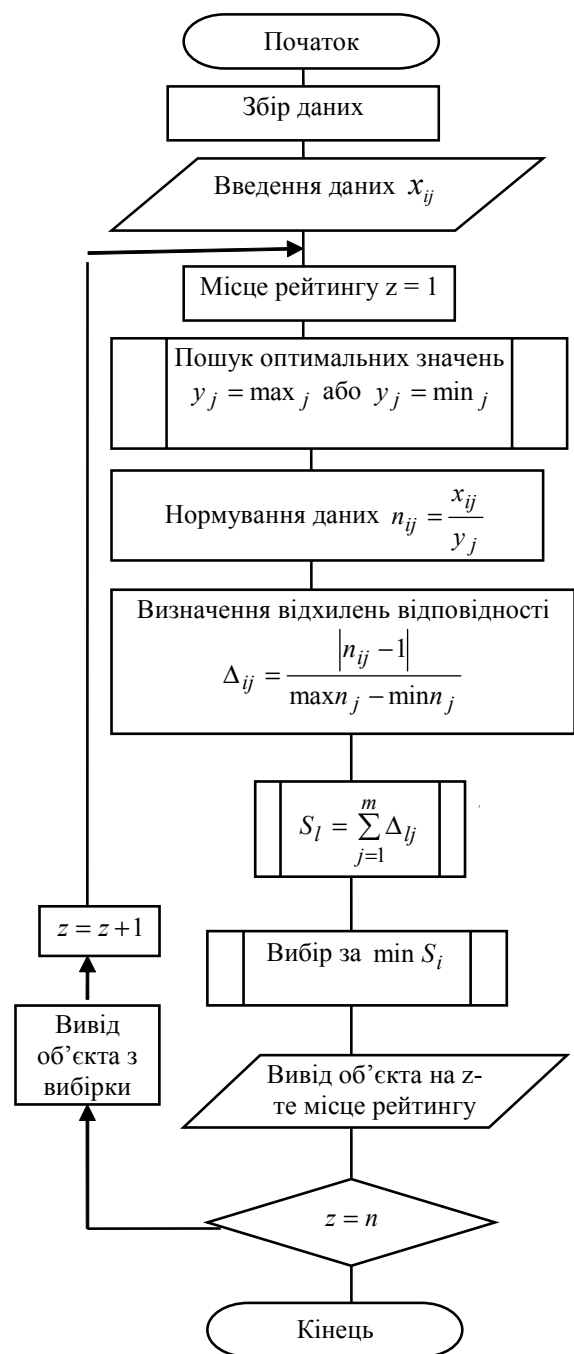


Рис. 4. Схема алгоритму методики II

Запропонований підхід компараторної ідентифікації екологічної якості за поданими алгоритмами методик реалізований для визначення стану міст з високорозвиненою промислово-соціальною інфраструктурою (X_i) за такими показниками: x_{i1} – приріст жителів у 1990-2000 рр., млн.; x_{i2} – кількість чоловік на приміщення; x_{i3} – відсоток заробітку, що йде на харчування; x_{i4} – відсоток будинків з водо- та електропостачанням; x_{i5} – кількість телефонів на 100 жителів; x_{i6} – кількість смертей на 100000 новонароджених; x_{i7} – кількість вбивств на 100000 жителів; x_{i8} – відсоток дітей у середніх школах; x_{i9} – рівень шуму (за шкалою від 1 до 10) (табл. 1).

Відповідно до фізичного змісту наведених параметрів для нормування обирають еталонні значення за таких вимог: y_1 – приріст населення має бути максимальним (свідчить про високу народжуваність); y_2 – кількість людей на приміщення має бути мінімальною (свідчить про якість умов для проживання); y_3 – процент заробітку, що йде на харчування, має бути мінімальним (свідчить про високий рівень заробітних плат та низьку вартість продуктів харчування); y_4 – процент будинків з електро- та водопостачанням має проживання); y_5 – кількість телефонів на 100 жителів має бути максимальною (свідчить про добробут населення); y_6 – кількість смертей на 100000 новонароджених має бути мінімальною; y_7 – кількість вбивств на 100000 жителів має бути мінімальною; y_8 – відсоток дітей в середніх школах має бути максимальним (свідчить про освіченість населення та рівень добробуту); y_9 – рівень шуму має бути мінімальним (свідчить про якість умов для проживання) (табл. 2).

Нормування здійснюється шляхом ділення відповідних даних з табл. 1 на дані табл. 2 (див. формулу (1)).

Отримані результати заносять у відповідну таблицю. Наступним є визначення відхилення від відповідності на одиницю існуючого розкиду за формулою (2):

$$y = \frac{|x - 1|}{x_{\max} - x_{\min}}.$$

Результати розрахунків порівнюють

для встановлення більш відповідного екологічним вимогам міста за методом компараторної ідентифікації (див. рис. 2), отримуючи оціночну табл. 3.

За вихідними даними таблиці 3 визначено, що найбільш придатний для проживання Токіо-Йокогама, він виводиться на перше місце рейтингу. Далі здійснюється перерахунок відхилення від відповідності на одиницю існуючого розкиду (2) для залишених міст з встановленням міри відповідності за компаратором за параметрами (див. рис. 3) (табл. 4).

Таким чином, отримуємо друге за рейтингом місто – Лос-Анджелес. Надалі відповідно до алгоритму знов будують таблиці відхилень і компараторної оцінки з метою встановлення наступного за рейтингом міста.

Кінцевий рейтинг має вигляд: 1. Токіо-Йокогама. 2. Лос-Анджелес. 3. Нью-Йорк. 4. Сеул. 5. Буенос-

Таблиця 1

Вхідні дані з оцінки якості промислових міст

Місто	Населення міста в 1990-2000рр., млн.	Чоловік на приміщення	Відсоток заробітку, що йде на харчування, %	Відсоток будинків з водо- та електропостачанням, %	Телефонів на 100 жителів	Смертей на 100000 новонароджених	Вбивств на 100000 жителів	Відсоток дітей в середніх школах, %	Рівень шуму (1-10 балів)
Токіо-Йокогама	0,8	0,9	18	100	44	5	1,4	97	4
Мехіко	5,4	1,9	41	94	6	36	27,6	62	6
Сан-Паулу	4,7	0,8	50	100	16	37	26,0	67	6
Нью-Йорк	0,6	0,5	16	99	56	10	12,8	95	8
Шанхай	3,6	2,0	55	95	4	14	2,5	94	5
Лос-Анджелес	2	0,5	0,9	94	35	9	12,4	90	6
Калькутта	3,9	3,0	60	60	2	46	1,1	49	4
Буенос-Айрес	1,4	1,3	40	86	14	21	7,6	51	3
Бомбей	4,2	4,2	57	85	5	59	1,1	49	5
Сеул	1,7	2,0	34	100	22	12	1,2	90	7

Таблиця 2

Оптимальні значення для наданих параметрів стану міст

Населення міста в 1990-2000рр., млн.	Чоловік на приміщення	Відсоток заробітку, що йде на харчування, %	Відсоток будинків з водо- та електропостачанням, %	Телефонів на 100 жителів	Смертей на 100000 новонароджених	Вбивств на 100000 жителів	Відсоток дітей в середніх школах, %	Рівень шуму (1-10 балів)
max	min	min	max	max	min	min	max	min
y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9
5,4	0,5	0,9	100	56	5	1.1	97	3

Таблиця 3

Результати використання компараторної оцінки даних

Місто	Населення міста в 1990-2000рр., млн.	Чоловік на приміщення	Відсоток заробітку, що йде на харчування, %	Відсоток будинків з водотопа електропостачанням, %	Телефонів на 100 жителів	Смертей на 100000 новонароджених	Вбивств на 100000 жителів	Відсоток дітей в середніх школах, %	Рівень шуму (1-10 балів)	Σ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Токіо-Йокогама	0	1	0	1	0	1	1	1	1	6
Мехіко	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2
Сан-Паулу	1	1	0	1	0	0	0	0	0	3
Нью-Йорк	0	1	0	1	1	1	0	1	0	5
Шанхай	0	0	0	1	0	1	1	1	0	4
Лос-Анджелес	0	1	1	1	0	1	0	1	0	5
Калькутта	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2
Буенос-Айрес	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Бомбей	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Сеул	0	0	0	1	0	1	1	1	0	4

Таблиця 4

Компараторна оцінка перерахованих даних для залишених за рейтингом міст

Місто	Населення міста в 1990-2000рр., млн.	Чоловік на приміщення	Відсоток заробітку, що йде на харчування, %	Відсоток будинків з водотопа електропостачанням, %	Телефонів на 100 жителів	Смертей на 100000 новонароджених	Вбивств на 100000 жителів	Відсоток дітей в середніх школах, %	Рівень шуму (1-10 балів)	Σ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Мехіко	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2
Сан-Паулу	1	1	0	1	0	0	0	0	0	3
Нью-Йорк	0	1	0	1	1	1	0	1	0	5
Шанхай	0	0	0	1	0	1	1	1	0	4
Лос-Анджелес	0	1	1	1	0	1	0	1	0	5
Калькутта	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2
Буенос-Айрес	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Бомбей	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Сеул	0	0	0	1	0	1	1	1	0	4

Айрес. 6. Шанхай. 7. Сан-Паулу. 8. Мехіко. 9. Бомбей. 10. Калькутта.

За алгоритмом методики II (див. рис. 4) визначають загальну суму відхилень (табл. 5).

Відповідно до отриманих даних визначають рейтинг, що має вигляд: 1. Токіо-Йокогама. 2. Лос-Анджелес. 3. Нью-Йорк. 4. Сеул. 5. Шанхай. 6. Буенос-Айрес. 7. Сан-Паулу. 8. Мехіко. 9. Бомбей. 10. Калькутта.

Отже, маємо майже однакові результати за двома методиками (незначні відмінності у 5 і 6 місті), але на відміну від поширеної методики II, запропонована методика компараторної ідентифікації вже на першому кроці аналізу дозволяє встановити рівень стану з екологічних питань для аналізованих об'єктів: для прикладу визначено задовільний рівень, оскільки за всіма показниками не отримано на виході компаратора 1, а тільки в межах відхилення 0,2 [3].

Запропоновані методики протестовані на об'єктах глобального моніторингу за методологією виміру сталого розвитку (СР) і порівнянням з отриманими результатами розрахунку індексу СР і рейтингу, наданих у роботі [1] (табл.6).

Таблиця 6
Вхідні дані глобального моніторингу

Країна	Населення 2005-2006 р.р.	Кількість телефонів на 100 жителів	Дитяча смертність	Сукупний % освіченого населення	Тривалість життя (р)
Болгарія	0	36,77	16	81,5	72,7
Ірландія	46559	50,24	6	99,9	78,4
Угорщина	0	36,12	9	89,3	72,9
Фінляндія	28607	52,35	5	101	78,9
Чилі	153307	23,04	12	86,1	78,3

Об'єктами дослідження X_i є країни, стан яких визначено такими показниками СР, взятими за основу екологічної відповідності: x_{i1} – приріст населення у 2005-2006 рр.; x_{i2} – кількість телефонів на 100 жителів; x_{i3} – дитяча смертність; x_{i4} – сукупний відсоток освіченого населення; x_{i5} – тривалість життя у роках.

Відповідно до алгоритму (див. рис. 3) визначають оптимальні значення для кожного критерію (табл. 7).

Таблиця 5
Загальні сума відхилень

Токіо-Йокогама	1,789
Мехіко	5,036
Сан-Паулу	4,56
Нью-Йорк	2,56
Шанхай	3,446
Лос-Анджелес	2,494
Калькутта	5,947
Буенос-Айрес	4,339
Бомбей	5,919
Сеул	3,445

Таблиця 7
Значення параметрів з оцінки відповідності

Приріст населення	Кількість телефонів на 100 жителів	Дитяча смертність	Відсоток освіченого населення	Тривалість життя (р)
max	max	min	max	max
153307	52,35	5	101	78,9

За методикою I (див. рис.3) отримують нормовані значення параметрів (табл. 8).

Таблиця 8
Результати нормування вихідних даних

Країна	Населення 2005-2006 р.р.	Телефонів на 100 жителів	Дитяча смертність	Відсоток освіченого населення	Тривалість життя (р)
Болгарія	0	0,702	3,2	0,807	0,921
Ірландія	0,304	0,96	1,2	0,989	0,994
Угорщина	0	0,69	1,8	0,884	0,924
Фінляндія	0,187	1	1	1	1
Чилі	1	0,44	2,4	0,852	0,992

Далі встановлюють відхилення відповідності на одиницю існуючого розкиду за формулою (2) і формують оціночні вихідні дані (табл.9).

Таблиця 9
Розрахунок відхилення відповідності

Країна	Населення 2005-2006 р.р.	Телефонів на 100 жителів	Дитяча смертність	Відсоток освіченого населення	Тривалість життя (р)	Σ
Болгарія	1	0,53	1	1	1	4,53
Ірландія	0,69	0,07	0,09	0,05	0,08	0,99
Угорщина	1	0,55	0,36	0,6	0,96	3,48
Фінляндія	0,81	0	0	0	0	0,81
Чилі	0	1	0,63	0,76	0,09	2,49

За компараторною оцінкою відповідно до алгоритму (див. рис. 3) встановлюємо послідовно рейтинг країн за рівнем їх сталого розвитку (табл. 10).

У двох країн – Ірландії та Фінляндії – однакова сумарна кількість одиниць. Для еталону порівняння прийнято Фінляндію, оскільки вона має мінімальну суму значень відхилень (табл. 9). Вона виводиться на перше місце рейтингу. Аналогічним чином здійснюється перерахунок для всіх інших країн і встановлюється

Таблиця 10
Результати компараторної оцінки

Країна	Населення 2005 - 2006 р.р.	Кількість телефонів на 100 жителів	Дитяча смертність	Супкупний % освіченості населення	Тривалість життя (р)	Σ
Болгарія	0	0	0	0	0	0
Ірландія	0	1	1	1	1	4
Угорщина	0	0	0	0	0	0
Фінляндія	0	1	1	1	1	4
Чилі	1	0	0	0	1	2

остаточний рейтинг, який порівняно з результатами оцінки рівня СР для 113 країн у роботі [1]:

1. Фінляндія (№1)
2. Ірландія (№9)
3. Чилі (№20)
4. Угорщина (№30)
5. Болгарія (№39)

Результат рейтингу за загальною сумою відхилень є цілком аналогічним:

1. Фінляндія (0,813)
2. Ірландія (0,996)
3. Чилі (2,497)
4. Угорщина (3,485)
5. Болгарія (4,532)

Таким чином, отриманий рейтинг цілком відповідає рейтингу сталого розвитку, що надано у роботі [1] за індексним методом. Це свідчить про практичну здатність наданої методики щодо її використання для розв'язання задач екологічної оцінки якості НС на глобальному рівні – визначення рейтингу сталого розвитку країн і задач відповідності вимогам екологічної рівноваги при дослідженні природно-техногенних об'єктів з додатковими можливостями встановлення першочергових факторів порушень вимог безпеки і загального рівня екологічної невідповідності.

3. Висновки

Запропоновано новий підхід до оцінки стану об'єктів навколишнього середовища з позицій сталого розвитку, що ґрунтується на методі компараторної ідентифікації. Аналіз одержаних результатів показав доцільність використання принципу системності з оцінки «стан–відповідність–фактори порушення рівноваги–рейтинг першочергових рішень». Обґрунтовано переваги впровадження компараторної ідентифікації в методику оцінки стану об'єктів, що дозволяє врахувати зв'язки між системами різної природи та передбачає визначення сталого розвитку країни не за усе-

редненими проміжними результатами, а шляхом врахування всіх наборів даних, якими вона характеризується.

Запропонована методологія оцінки якості системних природно-техногенних об'єктів (рис. 1-4) дозволила отримати такі науково-практичні результати:

- 1) відповідно до цілей удосконалення системного аналізу для розв'язання задач СР запропоновано алгоритмічне забезпечення реалізації методик оцінки екологічної якості складних об'єктів із застосуванням основ теорії компараторної ідентифікації (рис. 3, 4);
- 2) отримані збіжні рейтинги за результатами оцінки соціально-екологічного стану міст за двома запропонованими методиками (табл. 4,5);
- 3) встановлено ефективність запровадження компараторної ідентифікації для розробки системи оцінювання стану складних природно-техногенних і соціально-еколого-економічних систем.

4. Новизна отриманих результатів

У роботі вперше запропоновано:

- 1) системність підходу з аналізу складних за змістовністю об'єктів і невідповідностей їх стану поставленим вимогам безпеки (рис. 1);
- 2) впровадження основ компараторної ідентифікації з метою надання комплексної узагальненої оцінки досліджених системних об'єктів і встановлення рейтингу як для систем, так і для факторів порушень вимог безпеки (рівноваги «система – НПС»).

Література: 1. Згуровский М. З. Глобальное моделирование процессов устойчивого развития в контексте качества и безопасности жизни людей / М. З. Згуровский, А. Д. Гвишиани. К.: Політехніка, 2008. 331 с. 2. Петров К. Э. Компараторная идентификация модели формирования индекса устойчивого развития / К. Э. Петров // *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2009. №1. С. 36–46. 3. Машина Н. І. Економічний ризик і методи його вимірювання / Н. І. Машина. К.: Центр навчальної літератури, 2003. 188 с. 4. Бондаренко М. Ф. Про загальну теорію компараторної ідентифікації / М. Ф. Бондаренко, С. Ю. Шабанов-Кушнарченко, Ю. П. Шабанов-Кушнарченко // *Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал*. 2008. № 2 (69). С. 13–22.

Надійшла до редколегії 13.09.2013

Рецензент: д-р. техн. наук, проф. Шаронова Н.В.

Козуля Тетяна Володимирівна, д-р техн. наук, професор кафедри комп'ютерного моніторингу і логістики НТУ «ХП». Адреса: Україна, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 12, тел. 8-057-707-64-74; 8-057-707-65-05, E-mail: kozulia@kpi.kharkov.ua.

Білова Марія Олексіївна, магістр кафедри комп'ютерного моніторингу і логістики НТУ «ХП». Адреса: Україна, 61093, Харків, вул. Соціалістична, 63, кв.138, тел. : 8-050-323-86-68, E-mail: maria_belova-91@mail.ru.

РЕФЕРАТИ

УДК621.396.97

Збільшення точності визначення координат пасивними трипозиційними комплексами в умовах надмірності / Є.К. Поздняков, В.М. Ткаченко, В.В. Коротков // *Радіоелектроніка і інформатика*. 2013. № 3. С. 3-6.

Запропоновано метод визначення координат цілі в трьох-позиційних пасивних комплексах, заснований на використанні надлишкової інформації про положення цілі і введенні вагових коефіцієнтів. Результати імітаційного моделювання підтвердили збільшення точності результатів при використанні розглянутого методу.

Табл. 3. Іл. 4. Бібліогр.: 8 назв.

УДК621.391

Метод аналізу асимптотичних властивостей адаптивних алгоритмів вимірювання параметра радіосигналу при ексцесній заваді з використанням навчальної вибірки / О.С. Гавриш, С.В. Заболотній, О.В. Бурдукова // *Радіоелектроніка і інформатика*. 2013. № 3. С. 7-10.

Запропоновано процедуру адаптивного вимірювання параметрів радіосигналу по основній вибірці при використанні навчальної вибірки для вимірювання параметрів ексцесної завади. Розроблено метод для аналізу точнісних характеристик оцінок параметрів сигналу та завади.

Бібліогр.: 6 назв.

УДК004.415.2

Комп'ютерні програми для нейтронно-фізичних розрахунків ядерних реакторів АЕС / М.М. Чернишов // *Радіоелектроніка і інформатика*. 2013. № 3. С. 11-15.

Розглянуто стан атомної енергетики в Україні та дана класифікація існуючих у світі реакторів. Зроблено огляд конструкції реакторів з водою й важкою водою під тиском, реактора з киплячою водою та реактора на швидких нейтронах. Показано їх фізичні характеристики. Розглянуто реактори нового покоління. Дана характеристика комп'ютерних програм для нейтронно-фізичного розрахунку реакторів атомних електростанцій. Розглянуто питання організації програм та розрахункової моделі активних зон реакторів. Зроблено висновок, що комп'ютерні моделі для розрахунку реакторів створюються з метою розглядання історії цілої технологічної одиниці.

Табл. 2. Іл. 5. Бібліогр.: 23 назви.

УДК621.383

Методи реалізації структури фотоелемента із зарядовими насосами / В.О. Гусев, В.В. Старков, С.Є. Шоферістов, Д. Г. Мурзін // *Радіоелектроніка і інформатика*. 2013. № 3. С. 16-22.

Проведено аналіз конструктивно-технологічних варіантів виготовлення кремнієвих сонячних елементів наземного призначення. Показано, що реалізація короточасної технології термофотонної і лазерної обробки пластин «сонячного» кремнію приводить до якісної зміни механізму прольоту бази фотоперетворювача, зумовленого утво-

ABSTRACTS

UDC621.396.97

Increasing of the accuracy of the target position determination in the triple-station passive systems in conditions of the redundancy / Y.K. Pozdnyakov, V.N. Tkachenko, V.V. Korotkov // *Radioelektronika i informatika*. 2013. № 3. P.3-6.

There is shown the method of the target position determination in the triple-station passive systems which based on the use of the redundant information about target space position and on the weight ratios input. The results of simulation confirmed the increase of the accuracy in case of using the researched method.

Tab. 3. Fig. 4. Refs.: 8 items.

UDC 621.391

The method of analysis of asymptotic properties of adaptive algorithms of measurement of radio signal parameter when excess of noise using the training sample / O.Gavrish, S.Zabolotniy, O.Burdukova // *Radioelektronika i informatika*. 2013. № 3. P.7-10.

Using the method of polynomial maximization procedure adaptive measurement of radio signal parameter in the main sample, when using the learning sample to measure the parameters of excess of noise. The method is developed for analysis of the accuracy characteristics of the estimates of the parameters of the signal and noise.

Ref.: 6 items.

UDC 004.415.2

Computer programs for neutron-physical calculation nuclear reactors of the atomic power station / N.N. Chernyshov // *Radioelektronika i informatika*. 2013. № 3. P.11-15.

In work the condition of atomic engineering in Ukraine is considered and classification of reactors existing in the world is given. The review of a design of reactors with water and heavy water under pressure, a reactor with boiling water and a reactor on fast neutrons is made. Their physical characteristics are shown. Reactors of new generation are considered. We gave the characteristic of computer programs for neutron-physical calculation of nuclear power plants reactors in present work. We made the conclusion that computer models for reactors calculation are created in order to allow following the history of integral technological unity.

Tab. 2. Fig. 5. Ref.: 23 items.

UDC621.383

Methods of development the silicon solar cells with defects-impurities charge pumps / V.A. Gusev, V.V. Starkov, S.E. Shoferistov, D.G. Murzin // *Radioelektronika i informatika*. 2013. № 3. P.16-22.

The analysis of manufacture different kinds of silicon solar cells is carried out. It is shown rapid thermal processing forms a large structure defects. The latter can change the transport of mobile carriers and fulfill role of charge pumps. The results of experimental investigations increasing short circuits currents of photoelectric converters by using incoherent light

ренням просторових дефектно-домішкових комплексів, що грають роль зарядових насосів. Представлені результати експериментальних досліджень з підвищення струму короткого замикання сонячних елементів квазіімпульсною термофотонною обробкою.

Лл. 3. Бібліогр.: 15 назв.

УДК 621.39

Методологічна база керування бітовою швидкістю при формуванні передбачених кадрів / В.В. Бараннік, Н.А. Харченко, А.Є. Бекіров // *Радіоелектроніка і інформатика*. 2013. № 3. С. 23-27.

Побудовано методологічну базу для керування бітовою швидкістю стисненої відеоінформації, що необхідно для її адаптації відносно пропускної здатності каналу в телекомунікаційній мережі. Розроблено вирази, що дозволяють оцінити обсяг переданих даних стисненого відеопотоку для передбачених кадрів при різних варіантах вибору типу формованих блоків.

Лл. 3. Бібліогр.: 3 назви.

УДК 517.95:517.988

Застосування ітераційних методів до розв'язання еліптичних крайових задач з експоненціальною нелінійністю / С.В. Колосова, М.В. Сидоров // *Радіоелектроніка і інформатика*. 2013. № 3. С. 28-31.

Розглянуто задачу Діріхле для еліптичного рівняння з експоненціальною нелінійністю. Для чисельного розв'язання крайової задачі запропоновано два способи заміни її еквівалентним інтегральним рівнянням. Перший спосіб використовує функцію Гріна і дозволяє побудувати двобічні наближення до розв'язку. Другий спосіб використовує квазіфункцію Гріна.

Табл. 2. Лл. 2. Бібліогр.: 7 назв.

УДК 681.518

Автоматизована система навчання роботі з системою контролю версій «GIT» / О.О. Воронін, І.В. Гарячевська // *Радіоелектроніка і інформатика*. 2013. № 3. С. 32-35.

Розглянута розроблена автоматизована система навчання роботі з системою контролю версій Git. Дана система має два рівні доступу і дозволяє користувачам отримати необхідні навички роботи з системою контролю версій, а адміністратору надає зручний інтерфейс управління. Для адміністратора реалізовані функції управління користувачами та аналітичний блок статистики, який дозволяє оцінювати автоматизовану систему та зміст її завдань.

Лл. 9. Бібліогр.: 3 назви.

УДК 681.326:519.713

Кубітні технології аналізу і діагностування цифрових пристроїв / В.І. Хаханов, Baghdadi Ammar Awni Abbas, С.В. Чумаченко, А.С. Шкіль // *Радіоелектроніка і інформатика*. 2013. № 3. С. 36-45.

Запропоновано теорію і приклади реалізації кубітних моделей, методів і алгоритмів для підвищення швидкодії існуючих програмних і апаратних засобів аналізу і синтезу цифрових обчислювальних пристроїв за рахунок збільшення розмірності структур даних і пам'яті для одночасного зберігання оброблюваних станів. Представлені результа-

beam annealing are presented.

Fig. 3. Ref.: 15 items.

UDC 621.39

Methodological base bit rate control on building predicted frame / V. Barannik, N. Kharchenko, Bekirov Ali // *Radioelektronika i informatika*. 2013. № 3. P. 23-27.

Methodological framework is constructed to control the bit rate compressed video, it is necessary to adapt it to the channel throughput in a telecommunication network. Developed expressions to assess the amount of data transmitted compressed video for predicted frames with different choices of type formed blocks. Into account the following parameters: feature color model format of the color space type of video encoding, the block size and the macroblock in the frame. Key words: video flow, color space, components of the color model, predicted frame, coding polyadic.

Fig. 3. Ref.: 3 items.

UDC 517.95:517.988

Application of iterative methods for solution of elliptic boundary problems with exponential nonlinearity / S.V. Kolosova, M.V. Sidorov // *Radioelektronika i informatika*. 2013. № 3. P. 28-31.

The Dirichlet problem for elliptic equation with exponential nonlinearities has been considered. Two methods of numerical solution of the boundary problem have been suggested which use the substitution of initial problem with equivalent integral equation. The first method uses Green's function and allows to construct two-sided approximations to the solution. The second one uses quasi-Green's function. Results of computational experiments are presented.

Tab. 2. Fig. 2. Ref.: 7 items.

UDC 681.518

Automated training to work with version control system «GIT» / A. Voronin, I. Garyachevskaya // *Radioelektronika i informatika*. 2013. № 3. P. 32-35.

The article described automatised developed learning system work with version control system Git. Training this system has two levels of access and enables pupils to gain the necessary skills to work as an administrator provides a convenient interface control. Administrator functions are implemented users management trainee jobs directly, but this statistic analysis unit allows to evaluate the very elaborate system.

Fig. 8. Ref.: 3 items.

UDC 681.326:519.713

Qubit technologies for analysis and diagnosis of computer systems / V. I. Hahanov, Baghdadi Ammar Awni Abbas, S.V. Chumachenko, A.S. Shkil // *Radioelektronika i informatika*. 2013. № 3. P. 36-45.

A theory and examples of quantum models, methods and algorithms to improve the performance of existing software and hardware for analyzing and synthesizing digital computing devices by increasing the dimension of the data structures and memory for simultaneous storage of processed states are proposed. The investigation results of design theory for computer products, as well as

ти досліджень, що стосуються теорії проектування комп'ютерних виробів, а також моделей і методів кубітного діагностування цифрових систем, кубітного моделювання справної поведінки, аналізу дискретних пристроїв з відновленням працездатності примітивів, що відмовили.

Лл. 6. Бібліогр.: 13 назв.

УДК 621.39

Метод реконструкції зображень в нерівномірному базисі спектральних коефіцієнтів / В.В. Баранник, Ю.М. Рябуха, А.О. Красноруцький // *Радіоелектроніка і інформатика*. 2013. № 3. С. 46-51.

Запропоновано метод реконструкції трансформованих сегментів зображень в нерівномірному базисі спектральних коефіцієнтів. Доведено, що для усунення суттєвих недоліків, які притаманні статистичним декодерам, потрібно вдосконалення технологій та методів реконструкції трансформованих зображень.

Табл. 1. Лл. 4. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 621.327:681.5

Кодування вектора двокomпонентних кортежів для технологій компресії з трансформованням кадрів в інфокомунікаційних системах / С.В. Туренко // *Радіоелектроніка і інформатика*. 2013. № 3. С. 52-55.

Проведено обґрунтування інтерпретації усиченого вектора двокomпонентних кортежів у вигляді укрупненого позиційного числа невизначеної довжини, елементами якого є коди двоелементних біадичних чисел, утворених для окремих двокomпонентних кортежів. Здійснено доказ теорема, в результаті чого отримано кодоутворюючі співвідношення, що забезпечують формування коду для укрупненого позиційного числа з невизначеною довжиною по дворівневій схемі.

Лл. 1. Бібліогр.: 4 назви.

УДК 004.45

Системи об'єктно-реляційної проекції для C++ / М.А. Бондаренко, А.Ю. Носов // *Радіоелектроніка і інформатика*. 2013. № 3. С. 55-58.

Виконано узагальнення теоретичної інформації в галузі проектування систем об'єктно-реляційної проекції, визначено ключові технічні вимоги для проектування ORM-систем, проаналізовано механізми проекції та інтерфейси існуючих ORM-систем.

Табл. 1. Лл. 1. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 519.713:504.064

Метод компараторної ідентифікації в системі методичного забезпечення оцінки якості навколишнього середовища / Т.В. Козуля, М.О. Білова // *Радіоелектроніка і інформатика*. 2013. № 3. С. 59-65.

Наведено методичне забезпечення оцінки стану соціально-еколого-економічних систем на відповідність вимогам сталого розвитку та екологічної безпеки з елементами компараторної інформації. Обговорені результати практичної реалізації запропонованих методик, отриманих при розв'язанні питань регіонального і глобального рівнів дослідження.

Табл. 10. Лл. 4. Бібліогр.: 4 назви.

models and methods of quantum diagnosis of digital systems, qubit modeling fault-free behavior, analysis of digital devices with repair of failed entities are presented.

Fig. 6. Ref.: 13 items.

UDC 621.39

The method of reconstruction of the transformed image segments in nonuniform basis of spectral coefficients (NBSC) is proposed / V. Barannik, Yu. Ryabukha, A. Krasnorutskij // *Radioelektronika i informatika*. 2013. № 3. P. 46-51.

The work proves that for removing significant defects, which are inherent for statistical decoders, the improvement of the technologies and methods of the transformed images reconstruction is needed.

Tab. 1. Fig. 4. Ref.: 5 items.

УДК 621.327:681.5

Two-component vector encoding for tuples with compression technology transforming training in infocomm systems / S.V. Turenko // *Radioelektronika i informatika*. 2013. № 3. P. 52-55.

We justify the interpretation of the two-component vector truncated tuples in the form of close-positional number of indeterminate length whose elements are two-element codes biadicheskikh numbers formed for individual two-component tuples. Carried out the proof, whereby the ratio obtained kodoobrazuyuschee providing code generation for enlarged positional number of uncertain length of the two-level schemes, namely on the ground level a code representation for individual two-component tuples, and the second level is the formation of a common code representation for codes obtained at the first level.

Fig. 1. Ref.: 4 items.

УДК 004.45

Systems object-relational mapping for C++ / М.А. Bondarenko, A. Nosov // *Radioelektronika i informatika*. 2013. № 3. P. 55-58.

In this paper the generalization of theoretical information in the design of object-relational mapping was held, defined the key technical requirements for designing ORM-systems, analysed the mechanisms of mapping and interfaces of existing ORM-systems.

Tab. 1. Fig. 1. Ref.: 5 items.

UDC 519.713:504.064

Comparing identification method for the methodological support of environmental quality assessment / T.V. Kozulia, M. A. Bilova // *Radioelektronika i informatika*. 2013. № 3. P. 59-65.

Methodological support assessment of the state of the socio-ecological-economic systems to meet requirements of sustainable development and environmental security is given in the article including elements of comparing identification. The results of practical implementation of the proposed methods, resulting in addressing regional and global level research was discussed.

Tab. 10. Fig. 4. Ref.: 4 items.

ПРАВИЛА

оформления рукописей для авторов
научно-технического журнала

"Радиоэлектроника и информатика"

Тематика: радиотехника; электроника; телекоммуникации; компьютерные науки; компьютерная инженерия и техническая диагностика; системы и процессы управления; информационные технологии в науке, образовании, культуре, медицине, экономике, экологии, социологии.

Формат страницы — А4 (210х297 мм), поля: сверху — 15, справа, слева, снизу — 20 мм. Количество колонок — 2, интервал между ними — 5 мм. Редактор: Pagemaker 6.0 (можно, но нежелательно Word), гарнитура Times ET (Times New Roman Cyr), кегль — 10 пунктов, межстрочное расстояние — 110%, табуляция — 5 мм.

Объем рукописи — от 2 до 10 с. (языки: русский, украинский, английский). Текст рукописи должен быть структурирован и содержать все *основные части, характерные для научной статьи*: **введение** (отражает *актуальность*, формулирование *цели и задач* исследования); **сущность** (изложение основного материала исследования с описанием идеи, метода, и обоснованием полученных научных результатов); **выводы** (отражают результаты исследования, их *научную новизну* и *практическую значимость*, сравнение с лучшими аналогами, перспективы).

Структура рукописи: заголовок, аннотация, текст, литература, реферат (на украинском и английском языках), сведения об авторах.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ

УДК 519.713

НАЗВАНИЕ РУКОПИСИ

ФАМИЛИЯ И.О.

(Название желаемого раздела тематики)

Аннотация (на языке статьи, абзац 5-10 строк, кегль 9) помещается в начале статьи и содержит информацию о результатах описанных исследований.

Основной текст можно разделять на 2 и более подразделов с заголовками, выделенными полужирным шрифтом, пронумерованными арабскими цифрами, как показано в следующей строке.

1. Название раздела

Рисунки и таблицы (черно-белые, контрастные) помещаются в текст после первой ссылки в виде *переносимых объектов* и отдельно нумеруются, при наличии более одного рисунка (таблицы), арабскими цифрами. Рисунок содержит подрисуночную центрированную подпись под иллюстрацией (вне рисунка), как показано на рис. 1.

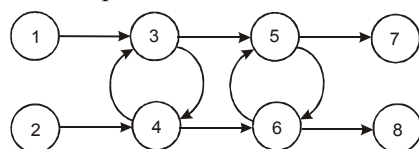


Рис. 1. Граф с контурами

Табличный заголовок располагается справа над таблицей (вне таблицы), что иллюстрируется табл. 1. Редакторы: CorelDraw, Table Editor, Excel.

Таблица 1

Шаг i	1	2	3	4	5	6
Ф1(1,3)	1	2	2	4	6	1

Формулы нумеруются при наличии ссылок на них в рукописи. Формулы, символы, переменные, встречающиеся в тексте, должны быть набраны как объекты Microsoft Equation. Рекомендуются высота формульных кеглей: переменная — 10 пунктов, индекс — 8, над- и подиндекс — 8, основной (индексный) математический символ — 12(10):

$$F_{i+i} = \sum_{i=1}^b F_j^i - \prod_{j=1}^{1+h} P_{R_{j+i}} + F^{j-1} + X^{\sum n^k}. \quad (1)$$

Формат переменных (желательно не курсивом — без наклона) в тексте и формулах должен быть идентичным. В тексте над- и подиндексы составляют 70 % от высоты кегля, которые рекомендуются опускать (поднимать) на 17 (33) % относительно основной строки.

Литература (включает опубликованные источники, на которые имеются ссылки в тексте, заключенные в квадратные скобки) печатается без отступа, кегль 9 пунктов.

Образец окончания текста рукописи (литература, сведения об авторах, реферат) представлен ниже.

Литература: 1. *Фамилия И.О.* Название книги. Город: Издательство, 1900. 000 с. 2. *Название сборника /* Под ред. И.О. *Фамилия.* Город: Издательство, 1900. 000 с. 3. *Фамилия И.О.* Название статьи // Название журнала. Название серии. 1997. Т. 00, № 00. С. 00-00.

Поступила в редколлегию 00.00.00

Рецензент: должность, ученая степень, Фамилия, И.О.

Фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание, должность и место работы. Научные интересы. Увлечения и хобби. Адрес, контактные телефоны.

Рефераты представляются на украинском и английском языках.

УДК 000.000.00

Назва статті /Ініціали. Прізвище // **Радіоелектроніка та інформатика.** 2000. № 00. С. 00-00.

Текст реферату.

Табл. 00. Лл. 00. Бібліогр.: 00 назв.

UDC 000.000.00

Title of paper /Initials. Surname // **Radioelektronika i informatika.** 2000. N 00. P. 000-000.

Text.

Tab. 00. Fig. 00. Ref.: 00 items.

Представление материалов

Рукопись, рефераты, сведения об авторах — в одном файле, *поименованном фамилией автора*, на дискете 3,5 дюйма. Твердая копия материалов — для граждан Украины — в одном экземпляре: рукопись, подписанная авторами, рефераты, акт экспертизы, внешняя рецензия, подписанная доктором наук, заявление на имя главного редактора со сведениями об авторах.

Адрес редакции: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, ХНУРЭ, комната 321, тел. 70-21-326, e-mail: ri@kture.kharkov.ua; hahanov@kture.kharkov.ua. <http://www.ewdtest.com/ri>

Рекомендовано Ученым советом Харьковского национального университета радиоэлектроники (протокол № 1от 27.09.2013)

Підписано до друку 27.09.2013. Формат 60х84^{1/8}.

Умов. друк. арк. 9,8. Зам. № б/н. Тираж 300 прим. Ціна договірна.

Віддруковано у СПД ФО Степанов В.В.

61168, Харків, Акад. Павлова, 311.